

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**


(повна назва інституту/факультету)

**Акустичних та мультимедійних електронних систем**

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

 **С.А. Найда**

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

з напряму підготовки

**171 Електроніка**

(код і назва)

на тему:

**"Волоконно-оптичні кабелі в системі охорони протяжного  
об'єкта"**

Виконав:

**Студент IV курсу, групи ДВ-61**

(шифр групи)

**Марунчак Артур Ігорович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

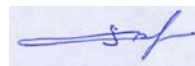


(підпис)

Керівник

**професор, д.т.н., проф., Розорінов Г. М.**

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)



(підпис)

Консультант

(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

**доцент, к.т.н., доцент кафедри мікроелектроніки  
Татарчук Д.Д.**

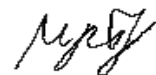
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

**Студент**



(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені І. Сікорського»**

Інститут (факультет) \_\_\_\_\_ Факультет електроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра Акустичних та мультимедійних електронних систем \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність

(спеціалізація) \_\_\_\_\_ 171 Електроніка (Електронні та інформаційні системи і  
технології телебачення, кінематографії та звукотехніки) \_\_\_\_\_  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ С.А. Найда \_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“01” червня 2020 р.

**ЗАВДАННЯ  
на дипломну роботу студенту**

\_\_\_\_\_ Марунчаку Артуру Ігоровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Волоконно-оптичні кабелі в системі охорони протяжного об'єкта

керівник роботи Розорінов Георгій Миколайович, професор, д.т.н.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "25" травня 2020 р. №1196-с

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 01 червня 2020 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Дослідження технології створення оптоволокна та бреггівських ґрат у оптоволокну, дослідження способів реєстрації сигналів вторгнення на об'єкт

4. Зміст роботи Технологія створення оптоволокна, методи реєстрації сигналів вторгнення на об'єкт, детальний огляд способу вторгнення на основі Бреггівських ґраток, способи створення одномодового волокна, методи запису волоконних бреггівських ґраток

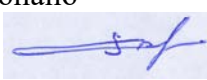
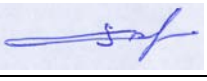
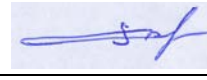
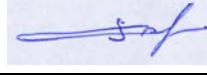
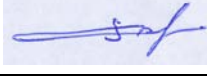
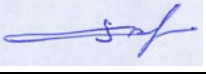
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Слайди презентації

6. Консультанти розділів роботи\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 25 лютого 2020 р.

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Написання першого розділу	25.02.2020	Виконано 
	Підготовка до публікації статті по темі роботи	20.04.2020	Виконано 
	Написання другого розділу	20.04.2020	Виконано 
	Написання третього розділу	10.05.2020	Виконано 
	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	1.06.2020	Виконано 
	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	6.06.2020	Виконано 

Студент

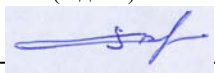


(підпис)

А. І. Марунчак

(ініціали, прізвище)

Керівник роботи



(підпис)

Г. М. Розорінов

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Дипломна бакалаврська робота: 77 с., 38 рис., 1 табл., 1 дод., 25 джерел.

Перелік ключових слів : ОПТОВОЛОКНО, БРЕГГІВСЬКІ ГРАТКИ, ПОКАЗНИК ЗАЛОМЛЕННЯ, ІНТЕРФЕРОМЕТР, МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ, МОНІТОРИНГ, ПЕРИМЕТРАЛЬНА СИСТЕМА, ОДНОМОДОВЕ ВОЛОКНО, СКЛУВАННЯ, ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНА КАРТИНА .

**Актуальність теми** роботи полягає у тому, що волоконно-оптичні кабелі можуть бути застосовані в якості датчиків для вимірювання деформацій, вібрацій та інших механічних впливів. Звісно ж, такі датчики знаходять своє застосування у сучасних системах безпеки.

**Метою дослідження** є огляд різних способів реалізації такої системи і, безпосередньо, вибір найбільш оптимального способу.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- Проаналізувати існуючі способи реєстрації сигналів вторгнення на об'єкт;
- Обрати один з цих способів та провести математичний, практичний і теоретичний огляд цього методу;
- Дослідити способи виготовлення оптичного волокна;
- Розглянути принципи створення бреггівських ґраток у оптоволокну;
- Проаналізувати методи запису бреггівських ґраток.

**Об'єкт дослідження** – процес функціонування волоконно-оптичних датчиків вібрацій та принципи їх виробництва.

**Предмет дослідження** – практичне застосування оптоволоконних кабелів в системах охорони об'єктів різного масштабу.

**Методи дослідження** – теоретичне дослідження можливостей оптичного волокна для охорони периметрів та протяжних об'єктів.

**Отримані результати:** у результаті виконання бакалаврської роботи було проаналізовано принципи виробництва оптичного волокна, методи запису бреггівських ґраток, математичну та практичну реалізацію волоконної

бреггівської ґратки, методи реєстрації вторгнення на об'єкт, види та класифікації оптоволоконних кабелів.

**Галузь застосування:** Охорона об'єктів.

## **ABSTRACT**

Diploma work: 77 p., 38 pic., 1 tabl., 1 add., 25 sources.

**The relevance** of the topic is that fiber optic cables can be used as sensors to measure deformation, vibration and other mechanical effects. Of course, such sensors are used in modern security systems.

**The object** of studies learning the principles of operation of fiber-optic sensors and the basics of their production.

**The purpose** of the study is to review different ways to implement such a system. Choosing the most optimal way.

To achieve this goal it is necessary to perform the following tasks:

- Analyze the existing methods of registration of intrusion signals on the object;
- Choose one of these methods and conduct a mathematical, practical and theoretical review of this method;
- Explore methods of manufacturing optical fiber;
- Consider the principles of creating Bragg lattices in fiber optics;
- Analyze the methods of recording Bragg lattices.

**The subject** of research is the practical application of fiber-optic cables in security systems of various scales.

**Research methods** - a theoretical study of the possibilities of different methods of registration of intrusion signals on the protected perimeter. Detailed review of the Bragg gratings method. Analysis of the production process of optical fiber, also learning methods of recording fiber Bragg gratings.

**The results obtained:** as a result of the bachelor's thesis, the principles of optical fiber production, methods of recording Bragg lattice, mathematical and practical implementation of Bragg fiber lattice, methods of registration of intrusion on the object, types and classifications of fiber optic cables were analyzed.

**Field of application:** Protection of objects.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ .....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП .....</b>	<b>9</b>
<b>РОЗДІЛ 1. Оптоволоконні кабелі в системі охорони протяжного об'єкту.....</b>	<b>11</b>
1.1 Роль оптоволоконної системи в питанні охорони периметрів. ....	11
1.2 Технологія оптоволоконна. ....	15
1.3 Види та класифікації оптоволоконних кабелів, їх застосування .....	21
1.4 Методи реєстрації сигналів вторгнення .....	26
1.5 Особливості та недоліки різних методів .....	32
Висновки до розділу 1 .....	34
<b>РОЗДІЛ 2. Метод реєстрації вторгнення на основі Бреґгівських ґрат. Теоретичний та практичний аналіз.....</b>	<b>35</b>
2.1 Бреґгівські датчики.....	35
2.2 Волокниста Бреґгівська ґратка.....	36
2.3 Спектральні властивості Бреґгівських ґраток .....	41
2.4 Принцип дії волоконно-оптичної системи .....	46
2.5 Ієрархічне виявлення та ідентифікаційний потік на основі ВБ.....	48
2.6 Виявлення порушень за допомогою аналізу автокореляції.....	49
2.7 Головні підсумки системи безпеки периметра на основі Бреґгівських ґрат .....	51
Висновки до розділу 2 .....	54
<b>РОЗДІЛ 3. Основи технологічного рішення при створенні волоконних бреґгівських ґраток. Методи запису волоконних бреґгівських ґраток.....</b>	<b>55</b>
3.1 Порівняльний аналіз способів створення одномодового волокна .....	55
3.2 Створення бреґгівських ґраток в оптоволоконні.....	60
3.3 Запис волоконних бреґгівських ґраток методом фазової маски.....	62
3.4 Запис волоконних бреґгівських ґраток інтерферометричним методом.....	64
3.5 Запис волоконних бреґгівських ґраток покроковим методом .....	65
Висновки до розділу 3 .....	67
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>68</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>69</b>
<b>ДОДАТОК А. SUMMARY .....</b>	<b>73</b>

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ**

- ПСО – Периметральна система охорони;
- ОБ – Оптичний багатомодовий;
- ВОК – Волоконно-оптичний кабель;
- ВБГ – Волоконна бреггівська ґратка;
- ПЗ – Показник заломлення;
- ОВ – Оптичне волокно;
- ФІД – Фазові інтерферометричні датчики;
- КІ – Компенсуючий інтерферометр;
- БГ1, БГ2 – Бреггівська ґратка(1,2);
- ФП – Фотоприймач;
- ЙВ – Ймовірність виявлення;
- ППТ – Помилковий показник тривоги;
- ШІ – Швидкість ідентифікації;
- ФМ – Фазова маска;
- NEC - National Electrical Code(національний електротехнічний кодекс);
- MSL – Medical Science Liaison (відділ медичної науки)
- WDM – Wavelength Division Multiplexing(спектральне ущільнення каналів);
- TDM – Time Division Multiplexing(мультиплексування часового поділу);
- NTT – Nippon Telegraph and Telephone(телекомунікаційна компанія Японії);
- PCVD – Plasma Chemical Vapor Deposition(відкладення хімічної пари в плазмі);
- VAD – Vapor-Phase Axial Deposition(парофазне осадження);
- MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition(модифіковане осадження хімічної пари);
- OVD – Outside Vapor Deposition(зовнішнє осадження пари).



## ВСТУП

Волоконно-оптичний кабель – це принципово новий продукт, який застосовується при побудові комп'ютерних мереж. Різниця полягає в сигналі, що передає дані – тут він світловий, а не електричний. Сьогодні оптичне волокно – це найсучасніший та найефективніший тип кабелю з високою швидкістю передачі інформації – близько 100 Гбіт/с. Завдяки властивостям використовуваних матеріалів та поширенню світла такий кабель повністю захищений від зовнішніх перешкод.

Електромагнітне випромінювання не впливає на якість та силу світлового сигналу. А сам сигнал не є причиною електромагнітних хвиль. Однак при створенні великих мереж необхідно встановити спеціальні приймачі та передавачі, які приймають світловий сигнал і перетворюють його в електричний. Крім того, такі перетворювачі працюють одразу у двох напрямках. Використання таких компонентів значно збільшує загальну вартість мережі.

Волоконно-оптичні кабелі забезпечують неймовірну швидкість передачі даних і можуть гарантувати, що нова або модернізована система буде відповідати вимогам мережі протягом багатьох років. Незважаючи на те, що технічні характеристики обладнання досить хороші, щоб витримати випробування часом, не менш важливо створити систему, яка буде фізично витримувати довгі роки. Фізичний захист мережі включає використання правильних інструментів і обладнання для захисту кабелів від зовнішніх впливів, а також від неправильного використання.

Оптоволоконні кабелі бувають різних типів, в залежності від кількості волокон і того, як і де вони будуть встановлені. Важливо ретельно вибирати кабель, так як цей вибір буде впливати на те, наскільки легко буде його встановити, з'єднати або укласти, і скільки це буде коштувати.

Сенс кабелю полягає в захисті волокон від навколишнього середовища, що зустрічається в установці. Кабель стане вологим? Чи повинен він витримувати високий натяг при монтажі в кабельних магістралях або

постійний натяг, як при повітряному установці? Чи повинен він бути вогнестійким? Ультра гнучкий? Чи буде кабель піддаватися впливу хімічних речовин або повинен витримувати широкий температурний діапазон? Всередині будівель кабелі не повинні бути такими міцними, щоб захистити волокна, але вони повинні відповідати всім вимогам пожежної безпеки.

Вибір волоконно-оптичного кабелю для будь-якого конкретного застосування вимагає врахування вимог до установки і навколишнього середовища, а також довгострокових вимог до оптоволокна, щоб охопити розширення до нових мереж зв'язку. Вимоги до установки включають в себе, де і як кабель буде встановлено, наприклад, протягнутий в кабельних магістралях зовні або розміщений в кабельних лотках в будівлі. Довгострокові вимоги повинні враховувати вологість або вплив води, очікуваний діапазон температур, натяг (повітряні кабелі) або інші фактори навколишнього середовища.

## **Розділ 1. Оптиволоконні кабелі в системі охорони протяжного об'єкту**

### **1.1 Роль оптиволоконної системи в питанні охорони периметрів.**

Система безпеки по периметру - це завжди перша технічна межа захисту будівель; Надійність та ефективність цієї складової дуже важливі для раннього виявлення зловмисників. Мета будь-якої системи безпеки - своєчасно виявити небезпечну подію, знайти місце, час та характер події, сигналізувати про подію, документувати подію, ініціювати заходи, що запобігають розвитку події, та нарешті представленні матеріалів для запобігання подібних подій у майбутньому. Периметральні системи характеризуються різними фізичними принципами, на яких базується робота охорони датчиків, тому набір випущених систем безпеки дуже широкий. Принцип роботи всіх систем заснований на тому, що зловмисник, що проходить через периметр, викликає порушення певних фізичних параметрів середовища, що реєструються спеціальними датчиками. Сигнали датчика обробляються електронним блоком (аналізатором або процесором), який генерує сигнал тривоги. Щодо подій, що з'явилися в останні роки, ми можемо побачити деякі загальні тенденції:

-Впровадження цифрових методів обробки сигналів датчиків дозволяє створювати "Розумні" системи з такими функціями, як розпізнавання типових сигналів вторгнення, локалізація зловмисника в зоні захисту, дистанційна діагностика та налаштування датчиків тощо.

-Мережеві технології все частіше використовуються для збору та централізованої обробки сигналів сенсорів.

-Зменшення споживання енергії датчиків дозволяє створювати системи з використанням автономного джерела живлення, датчики якого призначені для прихованої установки на периметрі.

Всім зрозуміло, що система безпеки по периметру повинна бути надійною, економічною, малопомітною і захищеною від перешкод. Специфіка умов експлуатації пред'являє додаткові вимоги щодо перепадів температури, сильних вітрів, снігу та вітру, граду тощо. Якщо ми також враховуємо економічні обмеження клієнтів, вибір схемосистеми часто стає дуже важким завданням.



Рис.1.1.1 – Волоконно-оптичний кабель-сенсор на практиці

Межа по периметру будівлі - найкраще місце для раннього виявлення вторгнень. Зловмисник, який взаємодіє насамперед з фізичним параметром, викликає обурення, які можуть виявити спеціальні сповіщувачі, якщо це огорожа у вигляді металевої решітки – її треба розрізати або піднятися над нею; чи це стіна чи шлагбаум - їх доведеться долати згори; якщо це стіна чи дах будівлі, вони повинні бути зруйнованими; Якщо це відкрита територія, її треба перетнути. Викликаючи фізичне вторгнення зловмисника з периметром, ми отримуємо можливість виявити це порушення відповідними засобами та виявити його на першій лінії охорони, тобто. по всьому периметру. Отже, системи безпеки по периметру є найбільш ефективним засобом захисту від несанкціонованого входу, оскільки вони видають

тривогу задовго до того, як зловмисник може проникнути в особливо важливі райони об'єкта, що охороняється.

Насамперед, будь-яка подібна система має відповідати таким правилам:

- Можливість раннього виявлення порушника до того, як він проникає в об'єкт;

- Відсутність «мертвих» зон і за можливості максимально точне слідування контурам периметра;

- Прихована установка;

- Несприйнятливість до змін кліматичних умов(таким, як температура, тиск, вологість і т.д.);

- Несприйнятливість до електромагнітних індустриальних перешкод поблизу об'єкту, що охороняється.

Крім того, усі ПСО повинні мати максимально можливу чутливість до виявлення навіть найдосвідченішого зловмисника, але в той же час повинні забезпечувати низьку ймовірність помилкових тривог.

Очевидно, що з набору сучасних систем безпеки по периметру неможливо вибрати ту, яка є універсальною і найкращою в усіх відношеннях. Вибираючи та проектуючи систему безпеки, необхідно враховувати безліч факторів - рельєф місцевості, топографію будівлі, дизайн та матеріал огорожі, екологічні умови, виробничі втручання, організацію обслуговування, захист тощо.

Багато виробників зацікавлені у створенні нових підземних систем безпеки з використанням пасивних датчиків, які не випромінюють високочастотну енергію. Застосування волоконно-оптичних датчиків у системах охорони периметра для захисту доступу до об'єктів або обмежених територій є також перспективним. Оптичний кабель розташовується по краю захищеного контуру і маскується захисним покриттям. Сенсорні властивості оптичного волокна обумовлені тим, що структура світлової хвилі у волокні надзвичайно чутлива до зовнішніх впливів, здатних модулювати амплітуду, фазу, режим склад (точкова структура) або хвильова поляризація. В системах

датчиків оптичних волокон ці характеристики аналізуються, і в результаті демодуляції та обробки сигналу отримуються дані про вплив на оптичне волокно або на несучу середу, з якою оптичне волокно міцно пов'язане. Датчик виявляє зміни тиску, викликані ходьбою або повзанням людей.

Цікавою особливістю оптичних систем є можливість їх використання для захисту не тільки огорож, але і відкритих майданчиків. У другому випадку волокно поміщається під поверхнею землі в канавці, яка заповнена гравієм.

Перевагою оптичних датчиків є їх нечутливість до змінних магнітних і електромагнітних полів, а недоліком є те, що вони є адаптованими датчиками. До переваг волоконно-оптичних систем відносять їх стійкість до електромагнітних та високочастотних перешкод, а також удари блискавки, що знижують ймовірність помилкових сигналів тривоги. Кабелі датчиків не випромінюють електромагнітну енергію і їх важко виявити за допомогою пошукової технології.

Привабливою особливістю систем є відсутність активного електронного обладнання по всьому периметру; це зменшує витрати на встановлення та обслуговування системи безпеки, а також використання цих датчиків у вибухових пристроях або під водою. Альтернативні можливості використання оптичних волоконних технологій у галузі пристроїв безпеки включають випадки захисту об'єктів із розширеними периметрами, об'єктів зі складним електромагнітним середовищем, об'єктів у районах із підвищеною блискавковою активністю.

Обмеження у використанні волоконно-оптичних систем включають складність поля з'ясування та ремонту кабелів у польових умовах, що вимагає використання мікроскопа та дорогого волоконно-зварювального обладнання.

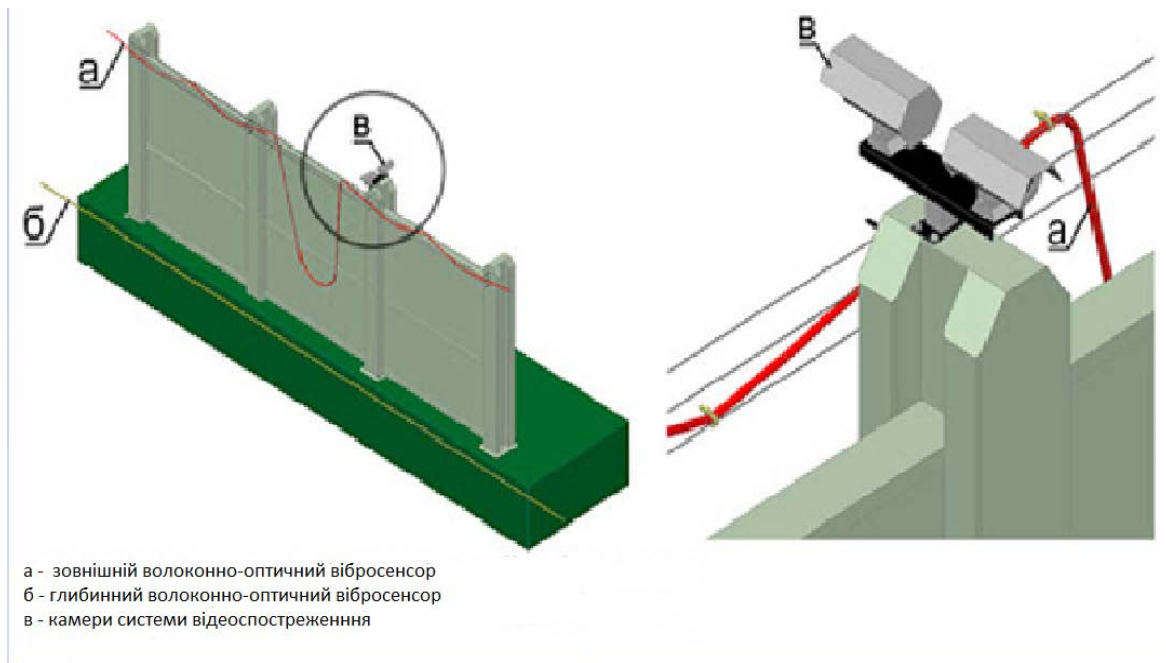


Рисунок 1.1.2 – Охорона периметра о'єктів великої протяжності  
 волоконно-оптичною системою охорони периметра СВМ-1

## 1.2 Технологія оптоволокна

Волоконна оптика або оптичні волокна - це довгі тонкі пасма акуратно натягнутого скла діаметром людського волосся. Ці волокна знаходяться в пучках, званих оптичними кабелями. Ми покладаємось на них для передачі світлових сигналів на великі відстані.

У широкомовному джерелі світлові сигнали кодуються даними ... ті самі дані, які ви бачите на екрані комп'ютера. Таким чином, оптичне волокно передає "дані" зі світлом в приймальну сторону, де світловий сигнал декодується як дані. Тому волоконна оптика насправді є середовищем передачі - «трубкою» для передачі сигналів на великі відстані з дуже високою швидкістю.

Волоконно-оптичні кабелі спочатку були розроблені для ендоскопів у 1950-х роках. Метою було допомогти лікарям оглянути пацієнта всередині людини без великих операцій. У 60-х роках телефонні інженери знайшли спосіб використовувати ту саму технологію для надсилання та прийому

телефонних дзвінків зі швидкістю світла. Це близько 300000 км в секунду у вакуумі, але він уповільнює до двох третин цієї швидкості в кабелі.

Світло пропускається через оптичний кабель, який неодноразово відбивається від стінок кабелю. Кожна світлова частинка (фотон) стрибає навколо трубки і продовжує своє внутрішнє дзеркальне відображення.

Промінь світла проходить через сердцевину кабелю. Сердечник знаходиться в середині кабельної та скляної конструкції. Накладка - це ще один шар скла, обгорнутий навколо сердцевини. Кришка призначена для зберігання світлових сигналів всередині сердцевини.

Існує багато типів волоконно-оптичних кабелів, які часто використовуються у волоконно-оптичних кабельних вузлах для виконання своїх функцій.

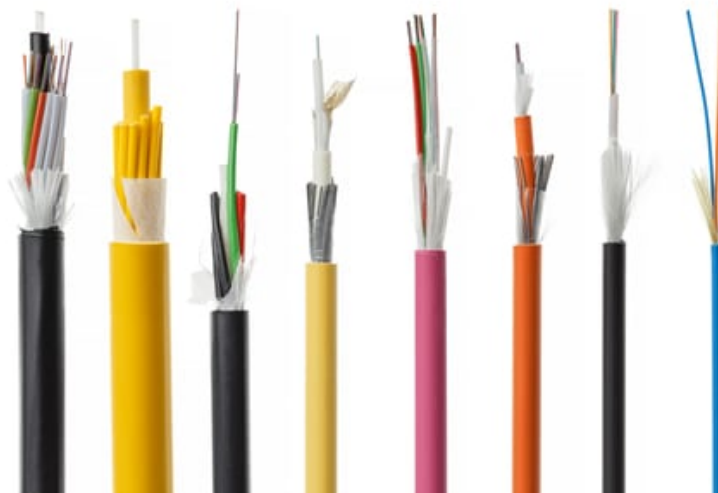


Рисунок 1.2.1 – Типи волоконно-оптичних кабелів

Волоконно-оптичні кабелі передають світлові сигнали в режимах. Режим - це шлях, за яким промінь світла рухається по волокні. Доступні волоконно-оптичні кабелі з одним або декількома режимами. Одномодовий волоконно-оптичний кабель зазвичай використовується для кабельного телебачення, Інтернету та телефонних додатків, де сигнали передаються через пучки волокон в одному режимі.



Багатомодове волокно - ще один тип оптичного кабелю. Це приблизно в 10 разів більше, ніж одномодовий кабель. Промені світла можуть проходити через ядро, слідуючи різними шляхами або в декількох різних режимах. Ці типи кабелів можуть надсилати дані лише на невеликі відстані. Тому вони використовуються, серед іншого, для підключення комп'ютерних мереж.

Діаметр серцевини багатомодових волокон зазвичай становить від 50 до 100 мкм. У той же час велика кількість типів хвиль (режимів) з різними геометричними параметрами поширюється вздовж такого волокна. Ці промені відчують множинні відбиття від кордону оболонки серцевини, що призводить до видимого ослаблення сигналу.

Діаметр серцевини волокна в одному режимі не більше 10 мкм. У такому хвилеводі може поширюватися лише один тип хвиль (режим), а загасання світла значно менше, ніж у багатомодових волокнах.

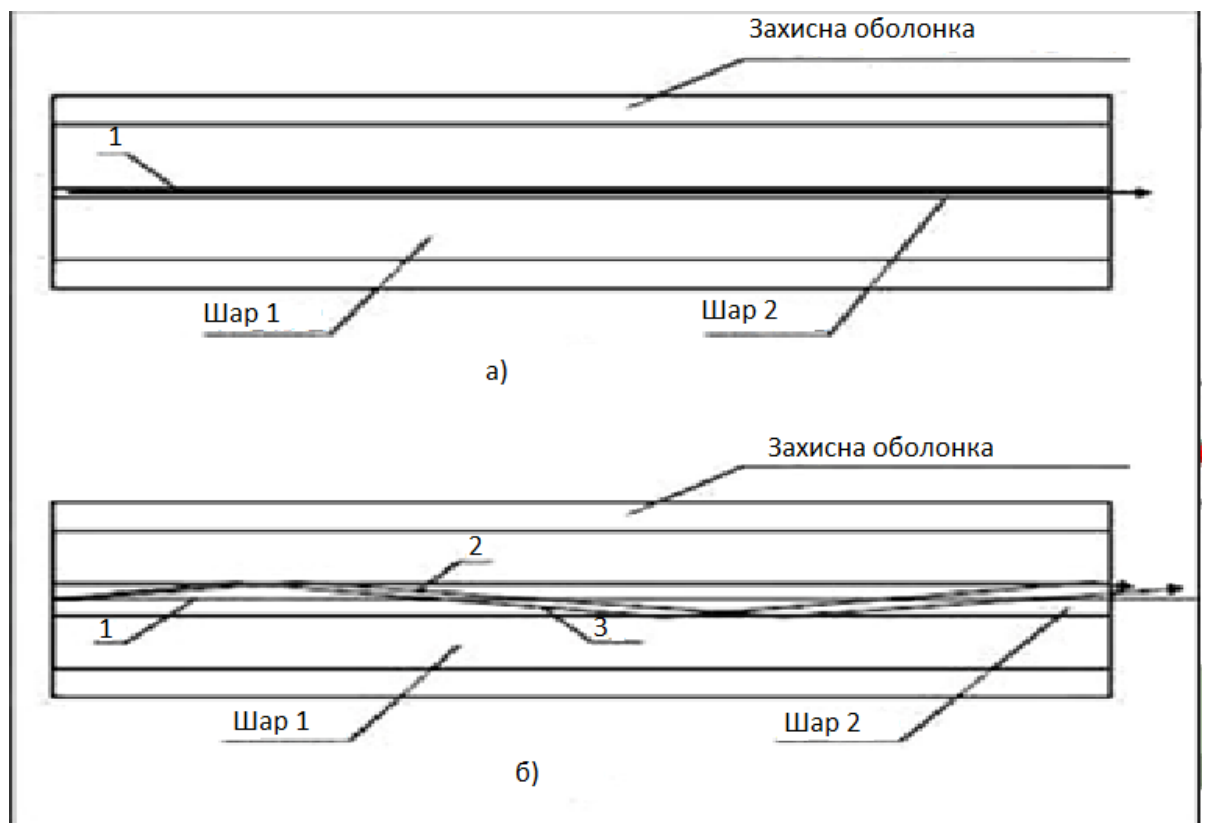


Рисунок 1.2.2 – Поширення променя світла в одномодовому (а) та багатомодовому (б) оптоволокну

Світло поширюється у внутрішньому шарі, зазнаючи повне внутрішнє віддзеркалення на кордоні шарів. В одномодових волокнах (рис. 1.1.2, а) з тонким (7-9 мкм) сердечником реалізується режим поширення однієї моди (одного типу світлової хвилі). Багатомодові волокна (рис. 1.1.2,б) з сердечником більшого розміру (50 і 62,5 мкм) дають можливість використовувати багато типів світлових хвиль, оскільки можливі різні оптичні шляхи (1, 2, 3).

Існує чотири типи багатомодових оптичних кабелів з маркуванням "ОБ" (оптичний багатомодовий). Промислова асоціація призначила їх ОБ1, ОБ2, ОБ3 та ОБ4. Кожен ОБ має вимогу пропускну здатності мінімального режиму.



Рисунок 1.2.3 – Багатомодові оптоволоконні кабелі

Крім того, волоконно-оптичні кабелі можна виготовляти відповідно до вимог галузевого стандарту для установки в подушки безпеки. Їх використовують у приміщенні зі спеціальними покривними матеріалами та композиціями. Ці кабелі, які називаються "кабелями надлишкового тиску", відповідають вимогам до полум'я та пожежонебезпеки.

Одноволокнисті оптичні кабельні конструкції містять єдину нитку скла. Симплексне волокно найчастіше використовується, коли потрібна лише одна лінія передачі та / або прийому між пристроями або коли використовується мультиплексований сигнал передачі даних (двостороння комунікація по одному волокну).

Двоволокнистий кабель складається з двох ниток скла або пластику. Цей кабель зазвичай використовується у форматі zipcord і найчастіше використовується для дуплексного зв'язку між пристроями, які потребують окремої передачі та прийому.

Виробники волоконно-оптичних кабельних вузлів, крім конструкцій кабелів над тиском, повинні створювати:

- "Сіамський" дизайн (два кабелі поруч, кожен зі своєю оболонкою)

- Гібридні кабелі (з мідними кабелями)

- Кабельні та композитні кабельні конструкції, включаючи інші кабелі з оптичного волокна, мідні або іноді силові кабелі

Більш короткі "патч-шнури" або "волоконно-оптичні перемички" використовуються для з'єднання різних частин електронного пристрою в серверній кімнаті, телекомунікаційній коробці або центрі обробки даних.

Є також декоративні пластикові волокна, що несуть кольорове світло. Склопластикові кабелі - зараз є основою нашої комунікаційної та комп'ютерної мереж. Багато тисяч кілометрів встановленого оптичного кабелю несуть багато видів інформації під землею, в тунелях, будівельних стінах, стелях та інших місцях, яких ви не бачите. Приклади використання оптичних волокон у повсякденному житті включають такі програми, як комп'ютерна мережа, віщання, військова техніка або медичний огляд.



Рисунок 1.2.4 - Волоконно-оптичний кабель з попередньо закритими кінцями

Волоконно-оптичні кабелі, що використовуються для передачі інформації, також можуть використовуватися як датчики для вимірювання деформацій, вібрацій та інших механічних впливів. Такі датчики все частіше використовуються в сучасних системах безпеки, особливо для створення сигнальних ліній для охорони огорожень по периметру.

Привабливість волоконно-оптичної технології визначається декількома факторами. Ці датчики стійкі до електромагнітного випромінювання та електрично безпечні.

Крім того, в більшості випадків промислові комунікаційні кабелі можуть використовуватися як датчики, які широко доступні і коштують менше, ніж вартість спеціально розроблених кабельних датчиків. Зовнішні впливи, такі як механічний тиск, деформація або вібрація, змінюють параметри оптичного волокна і, отже, властивості випромінювання, що проходить через волокно.

Оптичне волокно, як правило, є коаксіальним волокном. Світло поширюється вздовж середньої частини (серцевини) кабелю. На волокнисту серцевину прилягає прозора оболонка, яка має нижчий показник заломлення,

ніж серцевина. Світло, що поширюється під кутом до осі волокна, відбивається від інтерфейсу між серцевиною і оболонкою і зосереджується в середині волокна. Зовнішній непрозорий шар служить для механічного захисту кабелю.

Як джерело випромінювання зазвичай використовуються мініатюрні напівпровідникові лазери або світлодіоди. На виході кабелю випромінювання виявляється фотоприймачем, який перетворює оптичний сигнал в електричний. Під час деформації волокна змінюються умови внутрішнього відбиття, внаслідок чого змінюються також фазова та просторова характеристики променя на виході кабелю, які реєструються за допомогою фотодетектора і обробляються аналізатором сигналу.

### **1.3 Види та класифікації оптоволоконних кабелів, їх застосування**

Оптичний волоконний кабель (або волоконно-оптичний кабель) - це більш-менш гнучкий кабель, який містить одне або більше (іноді багато сотень) оптичних волокон. Завдяки захисним шарам (виготовленим з полімерів, а іноді й металів), які запобігають надмірному згину та пошкодженню через зовнішні впливи, волоконно-оптичні кабелі можуть бути набагато міцнішими, ніж голі волокна. Крім того, волоконно-оптичні кабелі захищають ламінат від вологи.

Для волоконно-оптичних кабелів використовуються різні конструкції:

-Існують прості волокна з покриттям (звані голими волокнами, незважаючи на покриття), де одиночне скловолокно оточене полімерним покриттям, діаметр якого часто становить 250 мкм, тобто вдвічі більше, ніж діаметр волокна. Такого низького рівня захисту часто достатньо для кабелів в деяких оптичних установках.

-Як варіант, можна використовувати щільні буферні кабелі, де волокно захищає більш товстий полімерний буфер (часто із зовнішнім діаметром 900

мкм). Буфер може захистити волокно від надмірного згинання, але не надто від натягу.

-Можна обмотати один або кілька щільних бамперних кабелів, наприклад, у більшу кабельну конструкцію, яка забезпечує додатковий захист, наприклад, із арамідної пряжі, розривного шнура та зовнішньої оболонки. Центральні елементи сили розташовані навколо волокна. (Підтягуючи таке волокно, його слід тягнути через джерело живлення). Деякі волокна цього типу використовуються як розподільні кабелі всередині будівель. Інші, так звані проривні кабелі або відгалужувальні кабелі, містять декілька дрібних кабелів, товщі, ніж окремі волокна в розподільних кабелях; вони зазвичай більші і дорожчі, ніж розподільні кабелі. Деякі волоконно-оптичні кабелі містять навіть сотні волокон.

-Два одноволонисті оптичні кабелі можуть бути об'єднані для формування двостороннього кабелю - наприклад, для передачі сигналів даних у двох напрямках по окремих волокнах.

-Плоскі кабелі містять кілька волокон (як правило, 12), які суміжні, що ведуть до плоскої смуги. Кілька стрічок можна розмістити один на одного. Така геометрія забезпечує високу щільність упаковки.

-Волоконні жгути можуть містити велику кількість відносно невеликих волокон, наприклад для освітлення або обробки зображень. Такі зв'язки можуть бути впорядковані ("підключені") або неорганізовані.

-Існують також оптичні волонисті кабелі, наприклад, пухкі трубки, де одне або кілька волокон з покриттям вільно лежать у напівжорсткій пластиковій трубці (на повітрі або в гелі, що запобігає проникненню вологи). Навколо вільної трубки (або декількох вільних трубок) можуть бути додаткові шари, такі як обгорткова плівка та зовнішня оболонка (наприклад, поліетилен). Структура може також включати металевий корпус для підвищення механічної міцності. Кабелі з сипучими трубами витримують певний ступінь натягу, що зазвичай призводить до розтріскування скляних

волокон, оскільки пухкі трубки можуть містити певну надмірну довжину волокон. Їх захисту часто достатньо для зовнішнього використання.

-Броньовані волоконно-оптичні кабелі мають додатковий зовнішній шар броні, що підвищує захист. Вони підходять для безпосереднього закопування в землю або на повітрі або у зовнішні канали.

-Підводні кабелі обладнані для використання в прісній або солоній воді. Вони повинні бути захищені від сильних механічних навантажень, таких як якоря на човні або рибальські снасті.



Рис.1.3.1 – Фотографія оптоволоконних діодних лазерів Coherent, що мають різні види волоконно-оптичних кабелів

Що стосується внутрішніх кабелів, то пожежна безпека є важливим аспектом, тоді як у випадку з зовнішніми кабелями велика зацікавленість полягає у вологостійкості та термостійкості. Спеціальні повітряні самонесучі кабелі, які можуть піддаватися впливу вітру та сонячного світла на свіжому повітрі (підвішені на стовпах), повинні мати особливо високу міцність на розрив та загальну міцність при використанні якоїсь сталевोї або арамідної пряжі. Зовнішні кабелі легко переносять умови в приміщенні, але часто

заборонені для використання в приміщенні (або лише з певними обмеженнями) через проблеми протипожежного захисту.

Детальна конструкція волоконного кабелю може бути відносно складною, оптимізованою для відповідного компромісу між міцністю, діаметром, вагою, вогнестійкістю, вартістю та іншими або спорідненими властивостями. Наприклад, механічні деталі можуть впливати на розсіювання режимів поляризації.

Кінці волоконно-оптичних кабелів часто оснащені волоконно-оптичними роз'ємами, які дозволяють порівняно легко підключити, якщо це можливо, за допомогою електричних кабелів. Однак оптичні з'єднання, як правило, більш чутливі, ніж електричні, і для їх підготовки чи очищення потрібні більш складні процедури та обладнання.

Кабелі на великі відстані виготовляються з'єднанням декількох кабелів, кожен з яких довжиною кілька кілометрів. Стабільні з'єднання можуть бути отримані шляхом зрощування, зокрема шляхом зрощування плавленням.

Класифікація оптоволоконних кабелів:

Існує багато типів волоконно-оптичних кабелів, до яких застосовуються деякі класифікації. Загальна класифікація згідно з Національним електротехнічним кодексом (NEC) у США така:

-OFC-кабелі - це електропровідні (C) волоконно-оптичні кабелі, тобто кабелі, що містять метали в підсилюючих конструкціях (які не використовуються для електричного з'єднання). На відміну від них, кабелі OFN не проводять і тому повністю ізолюються.

-Підйомні кабелі, позначені додатковим знаком "R" (наприклад, OFCR або OFNR), використовуються для з'єднання різних рівнів будівлі (вертикальні шахти). Вони оптимізовані так, що не підтримують поширення вогню між поверхами.

-Приточні кабелі, позначені додатковою літерою "P" (наприклад, OFCP або OFNP), використовуються в приміщеннях з електроживленням або вентиляцією, наприклад для кабелів, що проходять уздовж стелі. Якщо вони



піддаються впливу вогню, вони не повинні виділяти занадто багато диму і повинні бути вогнестійкими.

-Кабелі загального користування позначені буквою "G", наприклад OFCG або OFNG.

Наведені вище коди не визначають оптичні властивості волокон; вони можуть бути одномодовими або багатомодовими волокнами будь-якого типу.

Великі і міцні кабелі використовуються для передачі даних на суші і підводних човнах, часто перекриваючи відстані в тисячі кілометрів (використовуючи волоконно-оптичні підсилювачі). Менші волоконно-оптичні патч-корди можуть бути використані, наприклад, для підключення компонентів каналу передачі оптичних волокон в приміщенні. Ключовими перевагами волоконно-оптичних кабелів перед електричними кабелями для передачі даних є їх величезна пропускна здатність та низькі втрати (особливо в діапазоні довжини хвилі 1,5 мкм), але також можна використовувати стійкість до електромагнітних перешкод та можливість повністю ізольованих кабелів.

Сьогодні прокладено багато волоконно-оптичних кабелів для передачі даних, які ще не використовуються. Частково це пояснюється тим, що розпилення волокон значно дешевше, коли канал в землі вже відкритий, наприклад для прокладки електричних кабелів. Один може визначити ризик ніколи не використовувати волоконно-оптичні кабелі, а другий ризик того, що в майбутньому знадобляться додаткові земляні роботи.

У волоконних кабелях також багато "темних волокон", тобто волокон, які ще не використовуються. Вони можуть зберігатися в резерві для подальшого використання.

У лабораторних та промислових приміщеннях волоконно-оптичні кабелі часто підходять для передачі світла від джерела до програми - наприклад, від волоконного лазера високої потужності до зварювального робота на автомобільній фабриці або від оптичного зонда до вимірювального

приладу. , Оптичні накладні шнури часто використовуються для передачі короткої оптичної енергії на короткі відстані.

#### 1.4 Методи реєстрації сигналів вторгнення

Волоконно-оптичні системи використовують кілька методів для реєстрації сигналів вторгнення:

- Метод реєстрації міжмодової інтерференції - Напівпровідниковий лазер зазвичай генерує десятки режимів, близьких за частотою мод (спектральних ліній) з певним розподілом енергії в спектрі випромінювання. Коли багатомодовий волоконно-оптичний кабель піддається механічному напруженню, спектр випромінювання зазнає змін у його виході, що дає можливість виявити деформації або коливання кабелю. Внаслідок рухів або коливань багатомодового оптичного волокна розподіл енергії змінюється між окремими режимами. Ці зміни фіксуються оптичним фотодетектором і обробляються аналізатором. Кабель датчика (рис.1.2.1) підключений до стартового та кінцевого модулів. Аналізатор підключається до початкового модуля через пасивний ВОК. Випромінювання від напівпровідникового лазера подається на датчик і система реєструє сигнал, відбитий від термінального модуля.

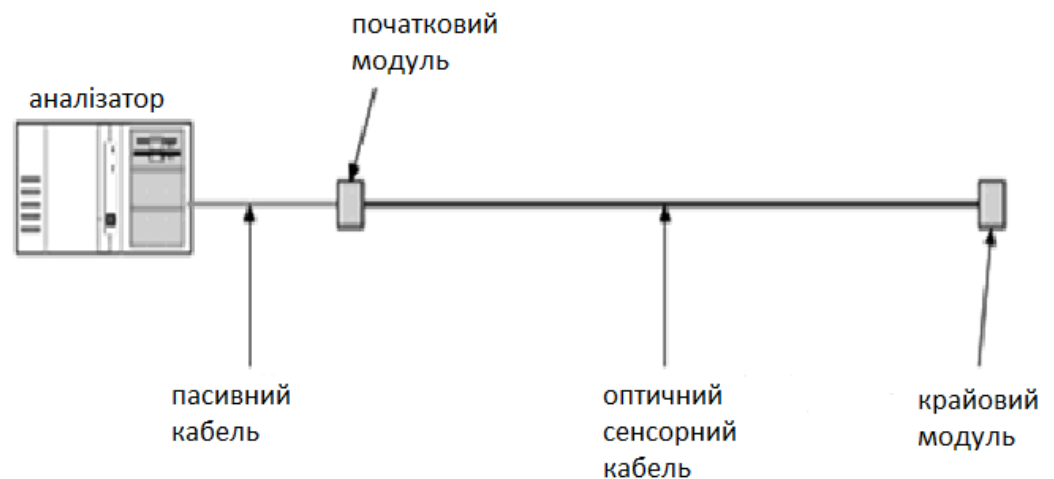


Рисунок 1.4.1 – Структурна схема системи, яка базується на реєстрації міжмодової інтерференції

Система, заснована на багатомодовому волокні, дозволяє організовувати зони безпеки на відстані до 10 км і в основному використовується для еластичних (деформованих) заборів.

- Метод реєстрації спекл-структури - На виході багатомодового оптичного волокна спостерігається так звана «точкова структура», що представляє собою неправильну систему світлих і темних плям. Під час деформації або вібрації волокна структура плям змінюється. Тут використовуються чутливі фотодетектори для виявлення деформацій кабелю. Датчик цих схемних систем - це мережа, спаяна з односмугового багатомодового оптичного волокна, захищеного пластиковою оболонкою. Імпульсне випромінювання від світлодіодів, які працюють в ближній інфрачервоній смузі, поширюється по всій мережі. Важливо, що не потрібно змінювати всю мережу під час розбиття окремих комірок. Регенерація датчика виконується за допомогою кабелів та спеціальних оптичних перемичок.
- Інтерференційний метод - Цей метод використовує принцип двопрменевої інтерферометрії. Ця технологія заснована на принципі виявлення мікронапруг в оптичних волокнах. Лазерний промінь розділений на два і спрямований на два однакових одномодових оптичних волокна. На приймальному кінці обидва пучка утворюють інтерференційний малюнок. Механічний вплив на чутливий кабель призводить до змін в схемі перешкод, які реєструються фотоприймачем. На рис.1.2.2 показана структурна схема системи. До складу протяжного датчика входять три окремих волокна багатоволокнистого ВОК. Обидва верхніх волокна виконують функцію чутливих елементів: вони живляться випромінюванням від напівпровідникового лазера, який працює в безперервному режимі. Третє (вихідне) волокно використовується для

передачі сигналів до системного аналізатора. Джерело випромінювання розташоване в блоці аналізатора, з якого лазерне випромінювання надходить на початковий модуль через вхідний пасивний кабель.

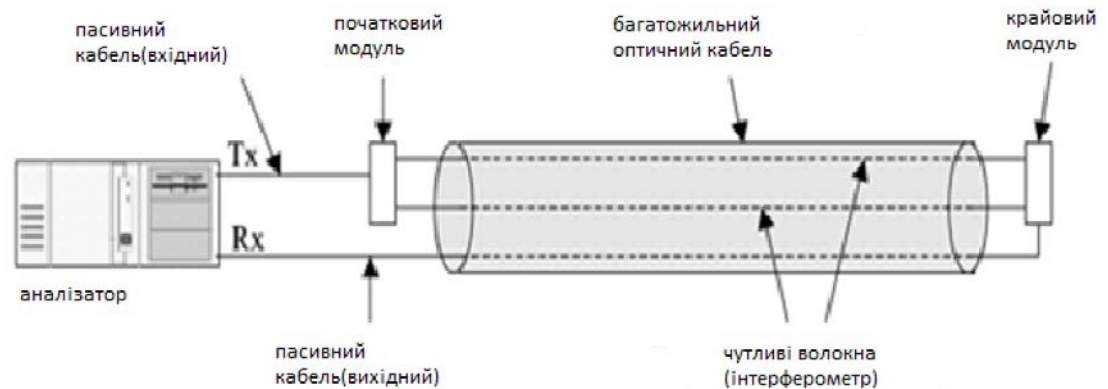


Рис.1.4.2 – Структурна схема системи, яка заснована на методі двопроменевої інтерференції

Особливістю системи є те, що одномодові жили стандартного багатожильного ВОК, призначені для передачі сигналу, можуть використовуватися як чутливі елементи. На рис. 1.2.3 показана структура такого кабелю, де дві одномодові жили є кронштейном чутливого інтерферометра. Сердечники повинні бути розміщені на діаметрально протилежних краях кабелю, щоб чутливість датчика до вигину була максимальною. Використання кабелю в одному режимі та висока енергія випромінювання дозволяють збільшити довжину однієї зони до 80 км. По чутливості ця технологія приблизно на три порядки краща, ніж метод інтермодального виявлення перешкод.

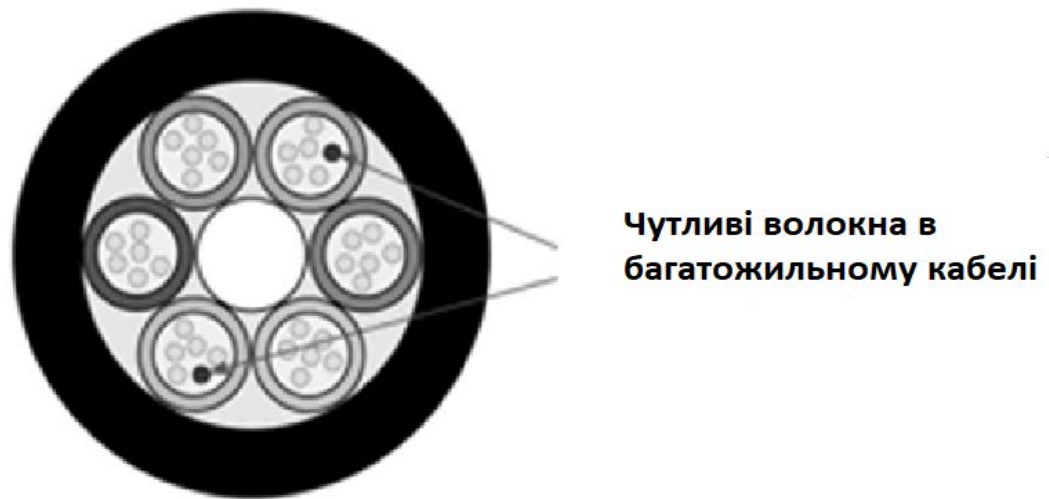


Рис.1.4.3 – Схема багатожильного ВОК

- Метод реєстрації на основі Бреггівських ґрат – відбиваючі Бреггівські ґратки в серцевині одномодового оптичного волокна можуть бути створені ультрафіолетовим випромінюванням ексімерного лазера шляхом опромінення через відповідну маску або голографічним способом(впливом двох інтерферуючих променів). Сегмент оптичного волокна між двома решітками - це інтерферометр Фабрі-Перо, відбиття (і передача) якого залежить від різниці оптичної фази оптичного сигналу, відбитого від першої та другої решіток. Під впливом деформації та акустичних коливань змінюється різниця фаз, а отже, і відбиття. Інтерферометричні датчики найбільш чутливі до змін довжини сегмента волокна під впливом зовнішніх факторів. Схема датчика, розподіленого з оптичних волокон з решітками на одну довжину хвилі, зображена на малюнку 1.4.3

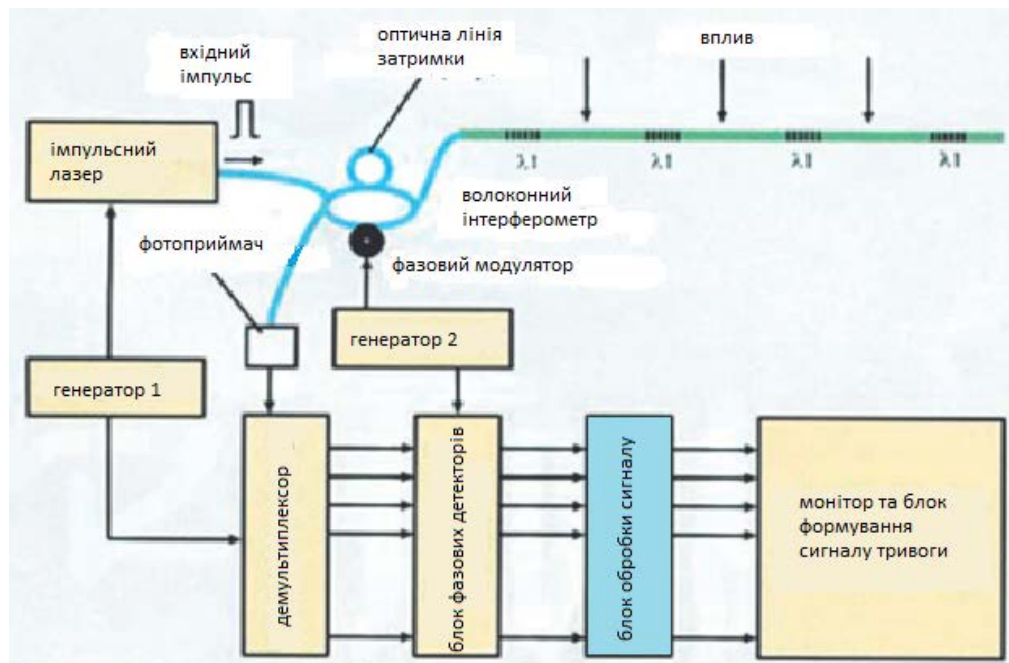


Рисунок 1.4.4 - Схема волоконно-оптичного розподіленого датчика з ґратами на одну довжину хвилі і часовим демультиплексуванням

В якості джерела випромінювання використовується одно частотний одномодовий напівпровідниковий лазер, що працює в імпульсному режимі. Імпульси кожної системи сітки надходять із різною затримкою в часі. Мультиплексування часового поділу використовується для відділення сигналів від кожної секції. Синхронне виявлення використовується для демодуляції сигналу, і в цю схему вводиться фазовий модулятор. Оптична лінія затримки утворює ряд зміщених у часі імпульсів, кожен з яких заважає імпульсу, відбитому від відповідної частини волокна. Вирішальну роль у реальному використанні таких волоконно-оптичних систем безпеки відіграє матеріал з волоконного покриття, який забезпечує збільшення чутливості волокна на 30 дБ порівняно з волокном без покриття. Зараз ведуться аналітичні роботи по створенню моделі взаємодії акустичної хвилі з різними матеріалами, а також експериментальних досліджень збільшення чутливості волокна до звукового тиску залежно від матеріалу оболонки.

Наведемо зведену таблицю характеристик системи охорони периметра на основі бреггівських ґрат (табл. 1.4.1):

Таблиця 1.4.1. Характеристики системи охорони периметра на основі бреггівських ґрат

№	Характеристика
1	Висока чутливість охоронної системи до будь-яких коливань.
2	Можливість програмної зміни порога чутливості - для зниження кількості помилкових спрацьовувань.
3	Отримання сигналу не тільки про факт перетину кордону, а й про місце її перетину з точністю до 2-10 м.
4	Можливість використання охоронної системи у всіх чотирьох режимах роботи: -Системи для захисту металевих огорож; -Системи для захисту важких огорож і стін. -Підземні системи з волоконно-оптичними кабелями. -Системи для захисту водних рубежів.
5	Низькі витрати на установку системи: а) при кріпленні на вже існуючу огорожу досить тільки прикріпити чутливе волокно до огорожі; б) при використанні в якості підземної системи охорони досить тільки прокласти чутливий волоконний кабель і засипати його землею.
6	Порівняно невелика собівартість системи в порівнянні з зарубіжними системами зі схожими характеристиками (не більше 50 тис. дол.).
7	Довжина периметра до 2-4 км, в залежності від необхідної точності місця перетину кордону.
8	Положення об'єкта, що перетинає кордон, відображається в реальному часі на екрані монітора, після факту перетину система продовжує працювати.
9	Система фіксує і множинне перетинання кордону.
10	Можливість визначення по частотному спектру характеру порушника: а) людина; б) автомобіль

## 1.5 Особливості та недоліки різних методів

На основі представленого огляду існуючих волоконно-оптичних систем захисту периметра на основі різних методів реєстрації можна зробити висновок, що волоконно-оптичні кабелі широко використовуються в системах безпеки периметра. Привабливою особливістю таких систем є стійкість датчиків до електромагнітного випромінювання та електробезпеки. Однак при всіх перевагах таких датчиків, системи, засновані на методі реєстрації міжмодової інтерференції, методі реєстрації спекл-структури або інтерференційному методі, мають ряд недоліків:

1. Системи, засновані на цих методах не можуть одночасно захищати периметр на м'якій або твердій огорожі, в землі чи водних кордонах. Водночас розробка такої "універсальної" системи значно знизила б її витрати, дозволила б замовнику зберегти право вибору встановлення та використання такої системи, а також у разі потреби також змінити умови її використання.

2. Відносно слабка розвиненість підземних систем, незважаючи на те, що цей вид охоронних систем є найбільш цікавим з точки зору охорони периметра, оскільки має низку беззаперечних переваг: прихованість від передбачуваних зловмисників, відсутність можливості будь-яким способом заглушити або дати помилковий сигнал у такій системі та обійти її.

3. Надзвичайно складний і дорогий процес встановлення підземних систем, оскільки системи не поширюються в одну лінію, а розподіляються по всій площі і складаються з декількох окремих елементів.

4. Неможливість фіксувати місце порушення кордону, а лише факт події (окрім системи на базі MSL, однак, система на основі MSL є надто дорогою і вимагає встановлення легкої металевої сітчастої огорожі, що не завжди прийнятно на великих відстанях у захищених територіях) .

Система безпеки по периметру на Брегівських гратах не має більшості вищезазначених недоліків і перевершує більшість існуючих аналогів за всіма



своїми характеристиками. У той же час найцікавішим є використання цієї системи як підземної системи, що дасть змогу приховати моніторинг усіх об'єктів, що проходять через охоронну зону, а також створити багаторівневі системи безпеки.

## **Висновки до розділу**

У даному розділі розглянуто питання актуальності волоконно-оптичної системи в сучасному питанні охорони периметрів та протяжних об'єктів, також були розглянуті особливості таких систем. Проаналізовано вимоги до реалізації систем, переваги оптичних датчиків. Досліджено технологію оптоволокна, його структурні особливості. Розглянуто класифікації та види оптоволоконних кабелів, їх застосування та нюанси реалізації. Також було проаналізовано існуючі методи реєстрації сигналів вторгнення на об'єкт. Їх виявилось декілька і усі вони мають певні особливості, які також було розглянуто. Для кращого розуміння та більш вдалої ідентифікації можна прослідити відмінності методів на основі представлених структурних схем. Було встановлено недоліки та особливості методів сигналів вторгнення на об'єкт, серед них було обрано один, найбільш оптимальний, який власне і був проаналізований у другому розділі дипломної роботи на основі теоретичного та практичного аналізу.

## Розділ 2. Метод реєстрації вторгнення на основі Бреггівських ґрат.

### Теоретичний та практичний аналіз

#### 2.1 Бреггівські датчики

Оскільки датчик на ґратці Брегга є новим, мало вивченим типом датчика, який має великий потенціал для моніторингу розподілених параметрів, ми виберемо його для вивчення та розробки конструкції вимірювальної системи. Цей датчик може вимірювати кілька фізичних параметрів, але в цій статті ми зупинимось на вимірюванні лише напруги в деформованих конструкціях, що виконується одночасно в багатьох місцях. Прикладами таких конструкцій є балки в будівлях, арки та прольоти мостів тощо. Для проведення цих вимірювань оптичне волокно з безліччю ґраток Брегга, що мають різні періоди, висвітлюється до структури, освітлюється широкопasmовим джерелом випромінювання, а записані спектри випромінювання відбиваються від кожної окремої решітки. Чим вище напруга конструктивного елемента, тим більше волокно розтягується і тим більше зсув спектра відбитого випромінювання. Сітка волокна Брегга є частиною оптичного волокна, в ядрі якого показник заломлення періодично змінюється в поздовжньому напрямку:

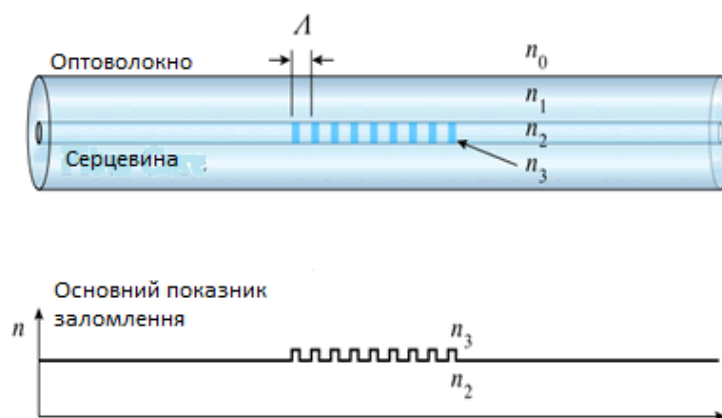


Рис.2.1.1 – Бреггівська волоконна ґратка

Оптичне поширення волокна - це поєднання власних режимів волокна: напрямок та випромінювання. Період модуляції показника заломлення вибирається для забезпечення необхідної резонансної взаємодії між вибраними режимами волокон. Ця модуляція заломлення індексу з'єднує основне оптичне волокно з режимом, що поширюється в протилежному напрямку. В результаті на дискретній довжині хвилі випромінювання, що поширюється вздовж оптичного волокна, відбивається від ґратки волокна Бреґґа. Коефіцієнт відбиття залежить від глибини модуляції показника заломлення, а середня довжина хвилі відбитої хвилі визначається умовою Бреґґа:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.1.1)$$

де  $\lambda_B$  – довжина хвилі бреґґівського резонансу,  $n_{eff}$  – ефективний показник заломлення серцевини волокна для центральної довжини хвилі,  $\Lambda$  – період бреґґівської ґратки.

Світло, що поширюється в ядрі оптичного волокна, розсіюється по кожній стороні сітки показника заломлення. Якщо умови Бреґґа не дотримані, світло, що відбивається від кожної сторони решітки, не ввійде у фазу і не згасне. Для довжин хвиль, які задовольняють стан Бреґґа, внески відбитого світла з кожної сторони сітки індексу заломлення додаються та розповсюджуються вздовж волокна у зворотному напрямку.

## 2.2 Волокниста Бреґґівська ґратка

Волокниста Бреґґівська ґратка- це мікроструктура, як правило, довжиною кілька міліметрів, яка може бути вписана в серцевину одномодового волокна. Це досягається поперечним освітленням волокна ультрафіолетовим лазерним променем та використанням фазової маски для створення інтерференційної картини в його серцевині. Це викликає постійну зміну фізичних характеристик кремнезему (рис.2.2.1). Ця зміна полягає в

просторовій періодичній модуляції основного показника заломлення, що створює резонансну структуру.

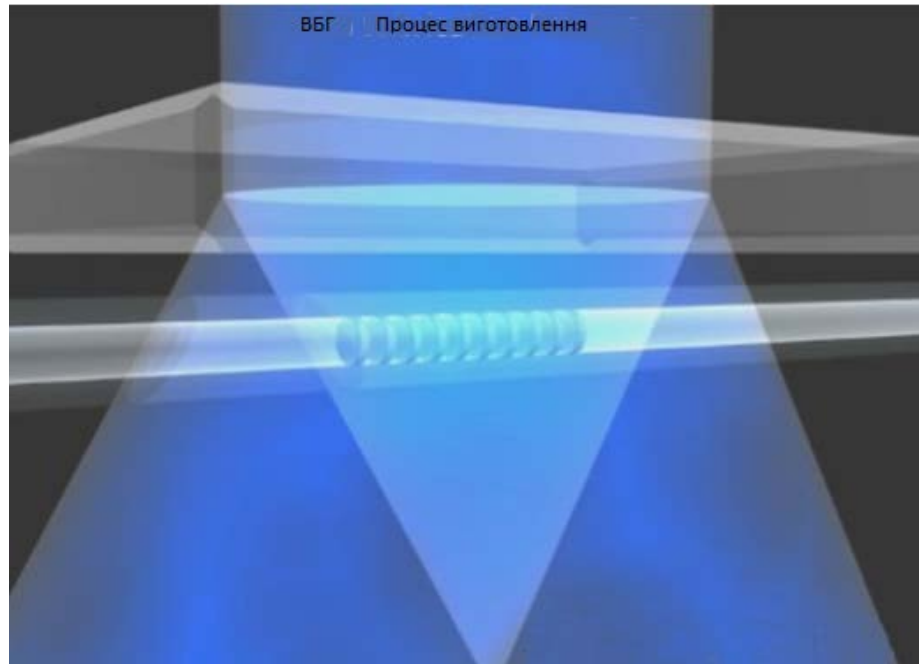


Рис.2.2.1 – Процес виготовлення волокнистої Бреггівської ґратки

Як резонансна структура, ВБГ буде виступати як дзеркало, що вибирає довжину хвилі; це вузькосмуговий фільтр. Це означає, що якщо світло з широкосмугового джерела вводиться в оптичне волокно, то через ґратку відбивається лише світло дуже вузької спектральної ширини, зосередженої на довжині хвилі Брегга. Інше світло, що залишився, проходить через оптичне волокно в наступну решітку Брегга без жодних втрат (рис. 2.2.2). Довжина хвилі Брегга визначається періодом мікроструктури та показником заломлення ядра.

ВБГ - це симетрична структура, тому він завжди буде відбивати світло на довжині хвилі Брегга, незалежно від того, на якій стороні він знаходиться.

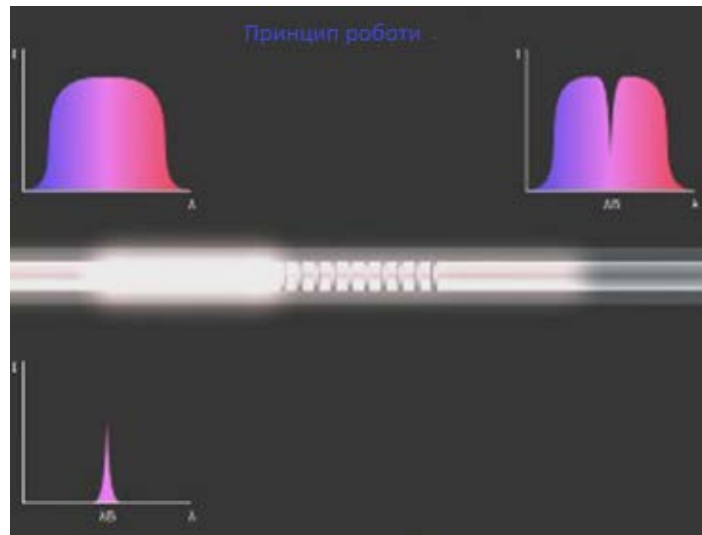


Рис.2.2.2 - (вгорі зліва: спектр світла, що надходить; праворуч вгору: спектр світла, що пропускається; центр: оптичне волокно з ядром ВБГ; представлення пропущеного та відбитого світла; знизу зліва: спектр відбитого світла)

ВБГ має унікальні характеристики для роботи в якості датчика. Наприклад, коли волокно розтягується або стискається, ВБГ вимірює напругу. Це відбувається тому, що деформація оптичного волокна призводить до зміни періоду мікроструктури та довжини хвилі Брегга (рис.2.2.3).

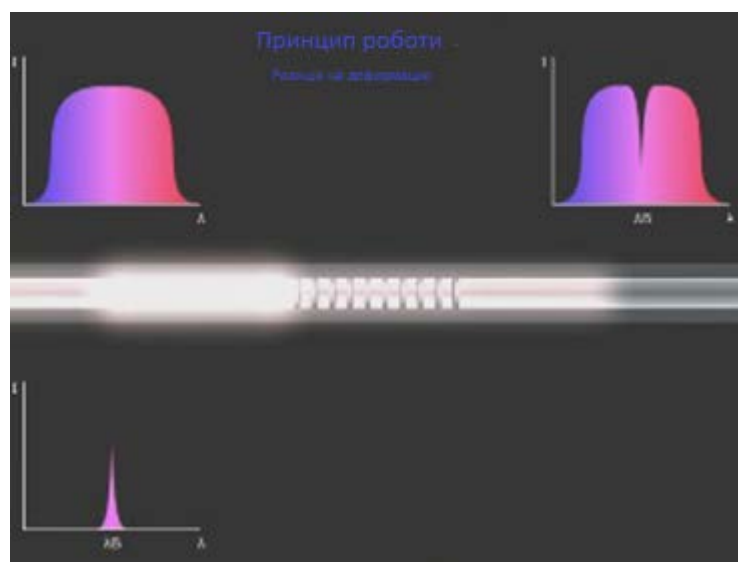


Рис.2.2.3 – Реакція на деформацію

Температурна чутливість також є невід'ємною частиною волоконної Бреггівської ґратки. У цьому випадку основним фактором, що впливає на зміну довжини хвилі Брегга, є зміна показника заломлення кремнезему, яка спричинена термооптичним ефектом (рис. 2.2.4). Також є внесок від теплового розширення, яке змінює період мікроструктури. Однак цей ефект незначний через низький коефіцієнт теплового розширення кремнезему.

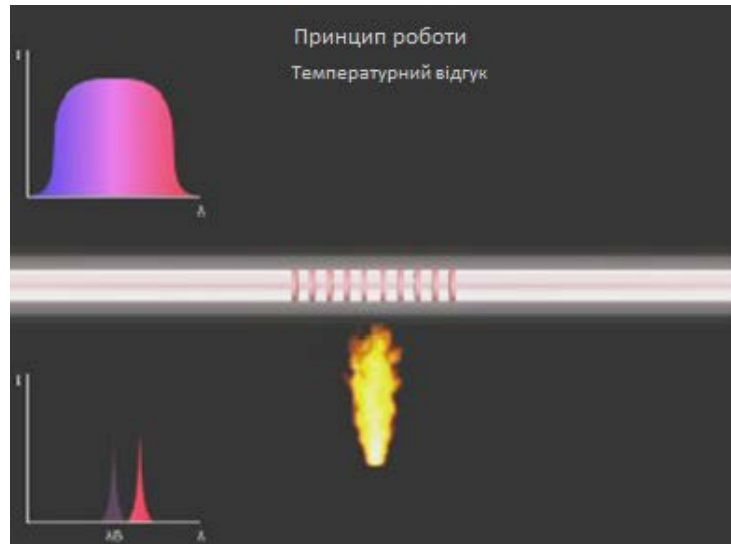


Рис. 2.2.4 – Температурний відгук

Однією з головних переваг цієї технології є її власна можливість мультиплексування. Насправді сотні волокон ґратки Брегга можуть бути записані на одному оптичному волокні, яке може бути в декількох міліметрах один від одного або в декількох кілометрах (мал.2.2.5). При правильній упаковці кожна з цих мікроструктур може бути чутливою до параметрів, відмінних від температури або деформації. Наприклад, тиск, прискорення, переміщення тощо. Вони забезпечують масив датчиків багатофункціональною характеристикою. Важливо підкреслити, що всі датчики можуть бути адресовані за допомогою одного оптичного джерела. Крім того, додавання все більшої кількості датчиків до одного і того ж волокна призводить до незначних втрат та відсутності перехресних розмов, якщо для кожного датчика зарезервована достатня спектральна смуга світлового спектру (рис.2.2.6).

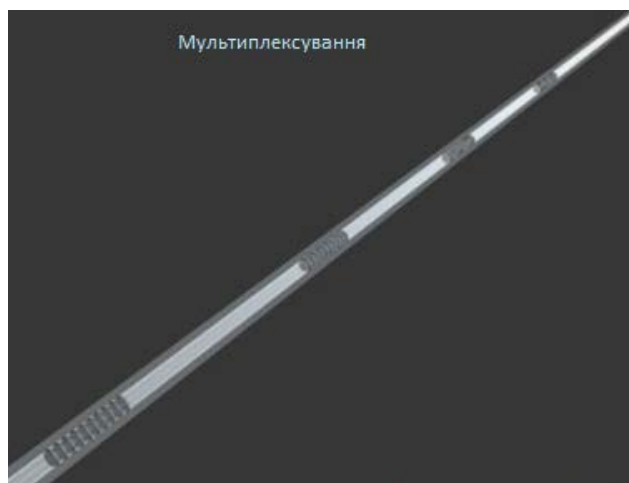


Рис.2.2.5 – Мультиплексування

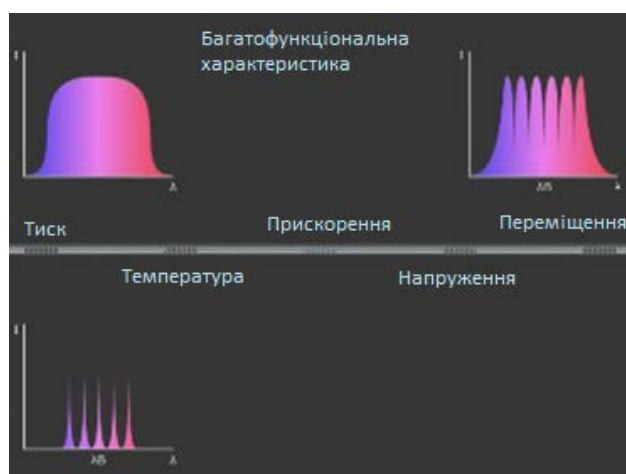


Рис.2.2.6 – Багатофункціональна характеристика

Як волоконно-оптичний датчик, Бреггівська ґратка має всі переваги, що зазвичай пов'язані з цими пристроями, такі як низькі втрати у відношенні довжини волокна, стійкість до електромагнітних та високочастотних перешкод, невеликий розмір і вага, іскробезпечна робота в середовищах, що характеризуються небезпечними умовами. Крім того, технологія волоконно-оптичної Бреггівської ґратки виявляє власні можливості серійного мультиплексування. Це робить його природною альтернативою традиційним технологіям електричного зондування.

### 2.3 Спектральні властивості Бреггівських ґраток

Розглянемо однорідну ґратку Бреґґа, утворену в серцевині одномодового оптичного волокна із середнім показником заломлення  $n_0$ . Профіль показника заломлення можна виразити так:



$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (2.3.1)$$

де  $\Delta n$  – амплітудна модуляція показника заломлення бреггівської ґратки,  $\Lambda$ - період бреггівської ґратки,  $x$  – відстань уздовж осі волокна. За допомогою теорії пов'язаних мод висловимо функцію спектра відбиття ґратки Брегга:

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sin^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}, \quad (2.3.2)$$

де  $R(\lambda, l)$  – коефіцієнт відбиття ґратки як функція від довжини хвилі  $\lambda$  і довжини ґратки  $l$ ,  $\Omega$  - коефіцієнт зв'язку,  $\Delta k = k - \pi/\Lambda$  – хвильовий вектор розладу, де  $k = 2\pi n_0/\lambda$  – це постійна поширення і  $s^2 = \Omega^2 - \Delta k^2$ . Коефіцієнт зв'язку для синусоїдальної функції модуляції показник заломлення виражається:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}, \quad (2.3.3)$$

де  $\eta(V) \approx 1 - \frac{1}{V^2}$ , ( $V \geq 2,4$ ) – функція, що визначає відсоток інтенсивності основної моди в серцевині волокна.

Для бреггівської довжини хвилі  $\Delta k = 0$ , тому вираз набуває вигляду:

$$R(\lambda l) = \tanh^2(\Omega l), \quad (2.3.4)$$

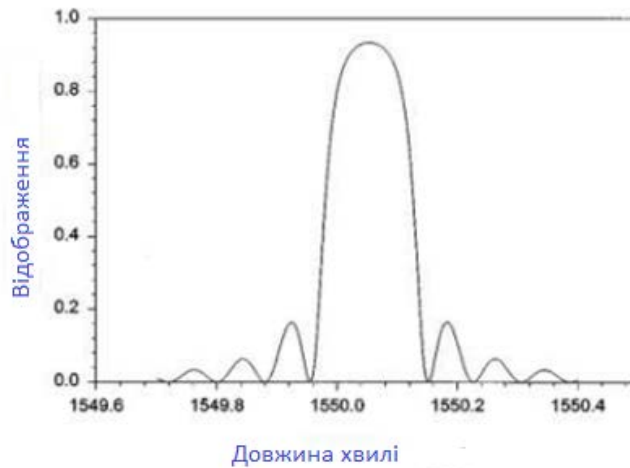


Рис. 2.3.1 – Розрахунковий спектр відбиття волоконної бреггівської ґратки

Чим більше глибина модуляції показника заломлення всередині волоконної ґратки Брегга, тим більший коефіцієнт відбиття ВБГ. З прикладу (2.3.1) ми бачимо, що резонансна довжина хвилі ВБГ залежить від ефективного показника заломлення серцевини світловоду і періоду модуляції показника заломлення:

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi l} t \sqrt{r_{max}} n h^{-1} (\sqrt{r_{max}}), \quad (2.3.5)$$

Де  $r_{max}$  – коефіцієнт відбиття на центральній довжині хвилі бреггівського резонансу ґратки. Так, наприклад, для ВБГ, що має бреггівськими резонанс на 1550 нм, з коефіцієнтом відбиття 10% і довжиною ґратки 15 мм, величина наведеної модуляції показника заломлення  $\Delta n$  відповідно до формули (2.3.5) становить  $1,077 \cdot 10^{-5}$ . Основний вираз для розрахунку ширини спектра відбиття ВБГ на половині висоти має вигляд

$$\Delta n = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}, \quad (2.3.6)$$

Де  $n$  – число періодів ґратки. Параметр  $\alpha$  приймається рівним 1 для сильновідбивних ґрат (ВБГ з відбиттям близько 100%), в той час як для слабких відбивних ґрат  $\alpha \approx 0,5$ .

Резонансна довжина хвилі волоконної бреггівської ґратки залежить від ефективного ПЗ серцевини світловоду і періоду модуляції ПЗ. У свою чергу ці два параметри залежать від зовнішніх деформуючих напруг і температури. Використовуючи вираз (2.1.1) зміщення центральної довжини хвилі відбиття під дією деформації і температури можна записати так:

$$\Delta \lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n}{\partial n} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta \Lambda}{\delta T} \right) \Delta T, \quad (2.3.7)$$

Перший доданок у виразі (2.3.7) демонструє вплив деформації на волокно. Його фізичний сенс полягає в зміні періоду ґратки та ПЗ, викликаного пружнооптичним ефектом. Цей ефект можна описати таким виразом:

$$\Delta \lambda_B = \lambda_{B0} (1 - p_e) \varepsilon(z), \quad (2.3.8)$$

де  $p_e$  – ефективна пружнооптична постійна, що визначається як:

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.3.9)$$

де  $p_{11}$  та  $p_{12}$  – компоненти пружнооптичного тензора,  $n$  – ПЗ серцевини, а  $\nu$  – коефіцієнт Пуасона. Для стандартного одномодового ОВ з параметрами  $p_{11} = 0,113$ ,  $p_{12} = 0,252$ ,  $\nu = 0,16$ ,  $n=1,482$  при довжині хвилі відбиття ВБГ  $\lambda_{B0} \approx 1550$  нм розрахункова чутливість до деформації становить 1,2 нм при відносному подовженні  $\varepsilon(z) = 10^6$ .

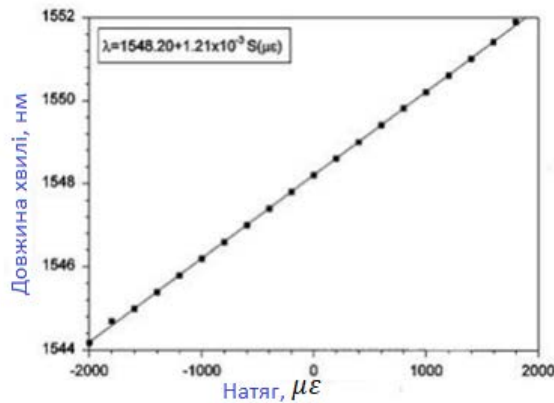


Рис. 2.3.2 – Залежність зміщення бреггівської довжини хвилі від прикладеної деформації

Експериментальні результати дослідження зсуву бреггівської довжини хвилі відбиття від деформації (розтягування/стиснення) представлені на Рис. 2.3.2. Другий доданок у виразі (2.3.7) показує температурний вплив на бреггівські ґратки. Зсув бреггівської довжини хвилі відбувається через температурне розширення кварцу, що викликає зміну періоду ґратки, а також зміни ПЗ волокна. Подібне зміщення  $\lambda_B$  при зміні температури  $\Delta T$  може бути записано як:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2.3.10)$$

де  $\alpha = (1/\Lambda) (\delta\Lambda/\delta T)$  – коефіцієнт термічного розширення (для кварцу  $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6}$ ),  $\xi = (1/n) (\delta n/\delta T)$  – термооптичний коефіцієнт (для волокон з добавками германію приблизно рівний  $8,6 \cdot 10^{-6}$ ). Видно, що зміна ПЗ є домінуючим ефектом. З рівняння (2.3.10) можна розрахувати, що температурний зсув ґратки Брегга в одномодовому оптичному волокні

становить  $\sim 13,7$  нм/°С. На рис 2.3.3. показана температурна залежність резонансної довжини хвилі волоконної брегівської ґратки:

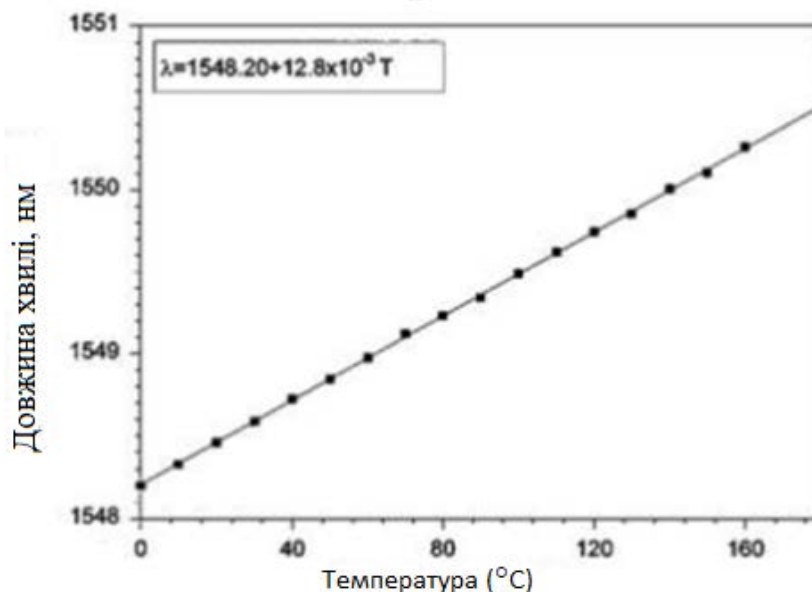


Рис.2.3.3 – Залежність довжини хвилі резонансу ВБГ від температури

Існує безліч різних способів побудови сенсорних систем на основі брегівських ґраток. У найпростішому випадку сенсорна система являє собою точковий датчик, з'єднаний через оптичний розгалужувач з джерелом світлового сигналу і блоком аналізатора (рис. 2.3.4). Сигнал від джерела відбивається чутливим елементом. Довжина хвилі відбиття фіксується блоком аналізатора.

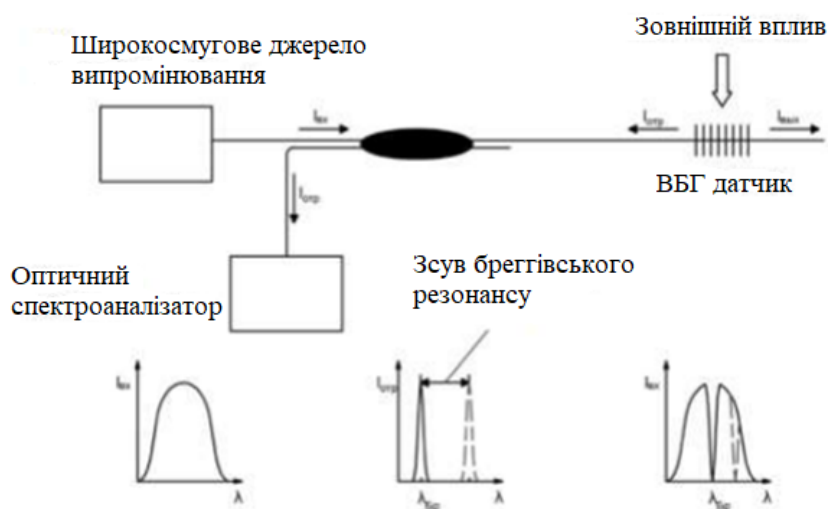


Рис.2.3.4 - Схема найпростішого волоконно-оптичного датчика на брегівських ґратах

Зазвичай аналізатор є (Bragg grating interrogator) вузькосмуговим спектрометром. Існують різні типи спектрометрів: від стандартної дифракції, де дифракційна ґратка використовується як дисперсійний елемент, до аналізаторів на основі інтерферометра Фабрі-Перо.

Однією з основних переваг оптичних датчиків є їх відносно легка здатність комбінуватись у масиви (мультиплексування). Два типи мультиплексування найчастіше використовуються в оптичних датчиках на бреггівських ґратах - мультиплексування поділу на довжину хвилі (WDM) та мультиплексування з поділом за часом (TDM). Мультиплексування часового поділу TDM засноване на аналізі швидкості сигналу в системі. Кожен датчик розділений частиною волоконного світловода, для проходження якого сигналу потрібен певний і відомий час. Джерело посилає короткий імпульс до системи. Вихідний сигнал - це ряд диференційованих за часом імпульсів, кожен з яких несе інформацію про стан кожного сенсора окремо. У чистому вигляді така мультиплексна система рідко використовується для комбінації бреггівських волоконних датчиків, але як частина більш складної системи є досить поширеною.

Принцип мультиплексування WDM заснований на тому, що кожен елемент датчика записується з власним унікальним періодом ґратки, що дозволяє їх розрізняти по спектру при аналізі і, відповідно, записувати значення кожного датчика окремо. Кількість датчиків у масиві обмежується переважно спектральною шириною джерела та динамічним діапазоном аналізатора.

## **2.4 Принцип дії волоконно-оптичної системи**

У фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) на основі масивів ВБГ ОВ є чутливим елементом, що призводить до значного зниження витрат. Відрізок ОВ між двома ґратками - це інтерферометр Фабрі-Перо. Під впливом деформації та акустичних коливань змінюється різниця фаз сигналів від двох сусідніх Бреггівських ґраток. Інтерферометричні датчики мають

найбільшу чутливість до змін довжини сегмента волокна під впливом зовнішніх факторів. Принцип дії розподілених вимірювальних комплексів з оптичними волокнами на основі ФІД в найпростішому випадку (у випадку одного ФІД) (рис. 2.4.1) полягає в наступному. Кожна ґратка Брегга БГ1 та БГ2 датчика відображає імпульс, що надходить до імпульсу від імпульсного лазера, на однаковій довжині хвилі Брегга. Затримка часу між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - волокні, укладеному між решітками. Компенсуючий інтерферометр (КІ) приймає відбиті імпульси. КІ, у свою чергу, роздвоює кожен з них.

Зміна в часі деформації чутливого елемента датчика внаслідок зовнішніх впливів спричиняє зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Останні перетворюються фотоприймачем (ФП) у зміну величини струму. Додатковий фазовий зсув  $\varphi_0 = \pi/2$  між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетекторана ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей інтерферуючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

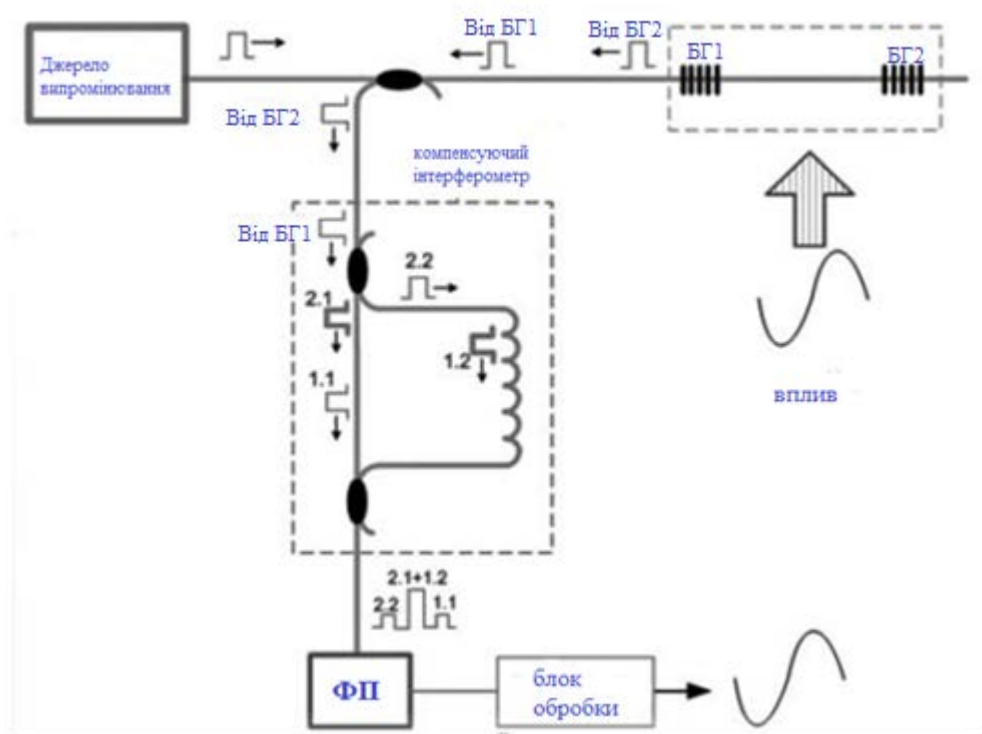


Рис.2.4.1 – Принцип дії волоконно-оптичної системи вібро-акустичного моніторингу на основі бреггівських ґраток

Тимчасові (якщо ВБГ мають однакову довжину хвилі відбиття) та спектральне ущільнення (окремі датчики складаються з ВБГ, що працюють на різних довжинах хвиль відбиття) використовуються для створення масиву датчиків на одному волокні. Використання волоконних бреггівських ґраток для створення ФІД дозволяє поєднати велику кількість датчиків в одному кабелі, розрізняючи сигнали від окремих гідрофонів за довжиною хвилі та тимчасової затримки.

## **2.5 Ієрархічне виявлення та ідентифікаційний потік на основі ВБГ**

Квазірозподілені волоконно-оптичні системи реєстрації вторгнень на основі мережі датчиків ВБГ побудовані, як показано на рис.2.5.1. У цій системі існує величезна кількість датчиків ВБГ з певною центральною довжиною хвилі для кожного з них, з'єднаних послідовно або паралельно по кабелю, щоб діяти як основні сегменти зондування. Кабель можна прикріпити до фізичного паркану або закопати під землею для вимірювання механічної деформації огорожі або інших зовнішніх відмов. У датчику ВБГ джерело світла з широкою смугою частот забезпечує оригінальні оптичні сигнали, одночасно демодулюючи оптичні сигнали, відбиті від окремих датчиків ВБГ вздовж волокна і перетворюючи їх у цифрові електронні сигнали.

І процесорний блок, який виконує функцію сигналізації, обробляє сигнальний масив і вирішує, чи є загроза вздовж захищеного периметра, де вона є і навіть що це таке. Основним принципом виявлення системи є контроль за зміщенням повернутої довжини хвилі Бреґга через обурення ґратки. Це найбільше стосується показників ймовірності виявлення(ЙВ), помилковий показник тривоги(ППТ) та швидкості ідентифікації (ШІ) для системи.

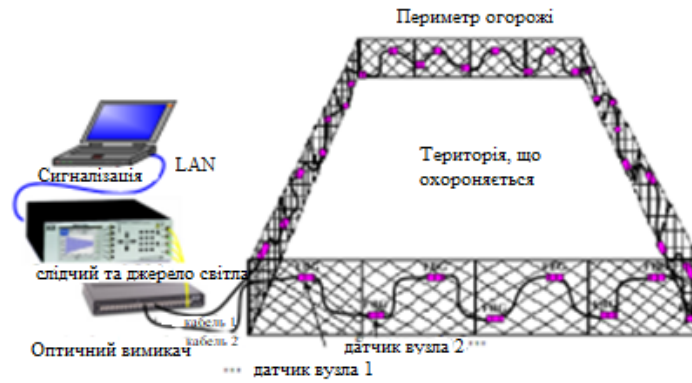


Рис.2.5.1 – Конфігурація волоконно-оптичної системи на основі сенсорної мережі ВБГ

Взагалі цілеспрямовані напади трапляються лише зрідка під час цілодобового моніторингу, і протягом більшої частини моніторингового часу насправді немає нападу чи вторгнення. Для ефективного виявлення обурення з високою надійністю представлений ієрархічний метод виявлення та ідентифікації, як показано на рис.2.5.2. На перших двох етапах ми зосереджуємось лише на меті виявлення і залишаємо ідентифікацію в спокої. При обчисленні процесу ідентифікації, отже, можна ігнорувати випадок, коли немає загрози, що цілком підходить для онлайн-моніторингу.

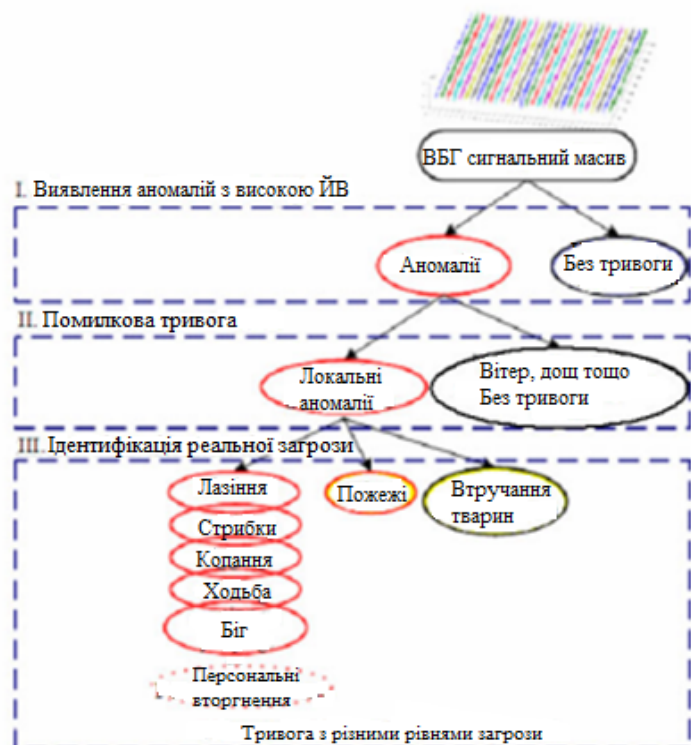




Рис.2.5.2 – Ієрархічне виявлення та ідентифікаційний потік в системі на основі ВБГ

## 2.6 Виявлення порушень за допомогою аналізу автокореляції

У мережі датчиків, як показано на рис. 2.5.1, всі датчики ВБГ мають дійсно різну здатність до зондування, обумовлену їхньою неоднаковою чутливістю з дещо різними умовами виготовлення та упаковки, різними способами кріплення чи закопування та зміною середовища. Чутливі вузли в мережі не еквівалентні, і величини отриманих сигнальних відповідей сильно змінюються. Отже, традиційний метод порогового регулювання енергії, безумовно, призведе до низької ймовірності виявлення або дуже високого помилкового показника тривоги у практичному застосуванні. А для периметра з огорожею із змішаних матеріалів ситуація стане гірше і він вже не зможе грати свою роль. Таким чином, автори представили нове рішення, засноване на різних характеристиках автокореляції між сигналами атаки та сигналами без атаки. Як показано на рис.2.6.1, несприйняття та кілька типових сигналів вторгнення для датчиків деформації ВБГ мають відмінні криві автокореляції. Лінія з невеликими квадратними позначками являє собою функцію автокореляції певного сигналу вторгнення, такого як сигнали про лазіння, удари та розгойдуванні, кореляційні затримки яких завжди набагато довші, ніж значення ліній без квадратних позначок, які вказують на випадок регулярних сигналів без зовнішнього порушення. Тут одиниця часової затримки – це вибірка з частотою дискретизації 500 Гц. З кривих автокореляції видно, що сигнал вторгнення, що генерується з певного джерела енергії, завжди сильно корелює самі з собою, тоді як сигнали без порушення завжди слабо корелюють. Таким чином, на першому кроці це можна розглядати як основний критерій виявлення вторгнень.

Цей метод або критерій виявився придатним для сигналів датчиків вібрації ВБГ, як це видно на рис.2.6.1. На рисунку 2.6.1 розглядаються

чотири типових сигнали вібрації: влізання, турбування тварин, підвищення температури та різання. Високі характеристики автокореляції сигналів вібрації аналогічні характеристикам сигналів деформації, але мають кілька компонентів коливань для одного і того ж сигналу події.

На етапі виявлення для виявлення дуже слабких сигналів від матриці датчиків приймається нижній поріг кореляції для підтримки відносно високої ймовірності вторгнення. Це також може стосуватися багатьох зовнішніх втручань, таких як вітер, дощ, сніг та град, які були б основними джерелами помилкових сигналів. Тому необхідно виключити ці помилкові тривоги на другому етапі. На щастя, зміни навколишнього середовища торкнуться майже всіх датчиків у мережі, тоді як реальні загрози завжди впливають на локальну місцевість. А локальні та глобальні ефекти можна безпосередньо відрізнити по кількості датчиків тривоги та їх розташуванню.

Усуваючи джерела неприємностей, які часто зустрічаються, види подій, які слід розпізнати, значно зменшуються, що не тільки полегшує обчислювальне навантаження ідентифікації, але й робить наступну ідентифікацію набагато надійнішою.

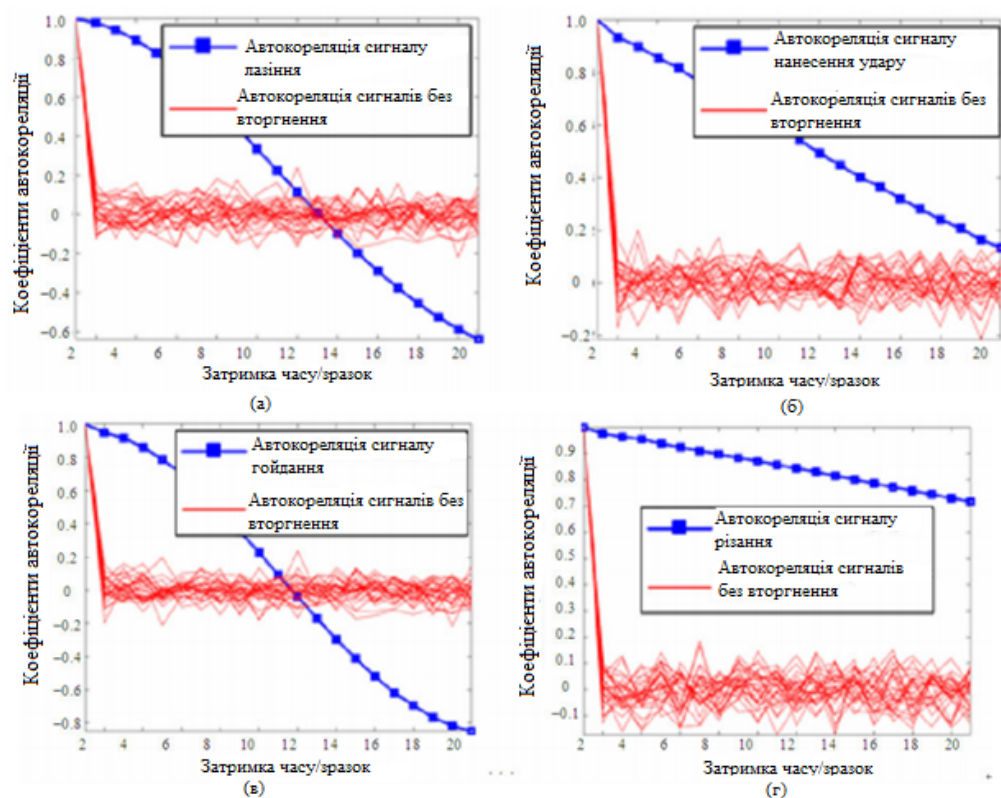


Рис.2.6.1 - Кореляційні характеристики деяких типових сигналів чутливості до ВБГ: (а) сходження, (б) удару, (в) розгойдування та (г) різання.

## 2.7 Принцип роботи системи безпеки периметра на основі Бреґівських ґрат

Принцип роботи системи полягає в наступному. Волоконно-оптичний відрізок між двома бреґівськими ґратами - це інтерферометр Фабрі-Перо. Під впливом деформації та акустичних коливань змінюється різниця фаз двох променів, відбитих від двох сусідніх ґраток. Результатом є зміна інтерференційної картини двох відбитих променів.

Інтерферометричні датчики найбільш чутливі до зовнішнього віброакустичного впливу на оптичне волокно.

Конструкційно волоконно-оптична система безпеки периметра на бреґівських ґратках складається з активної частини (блок введення і виводу випромінювання та плата для обробки інформації) та пасивної частини (кабель чутливий до вібраційно-акустичних впливів).

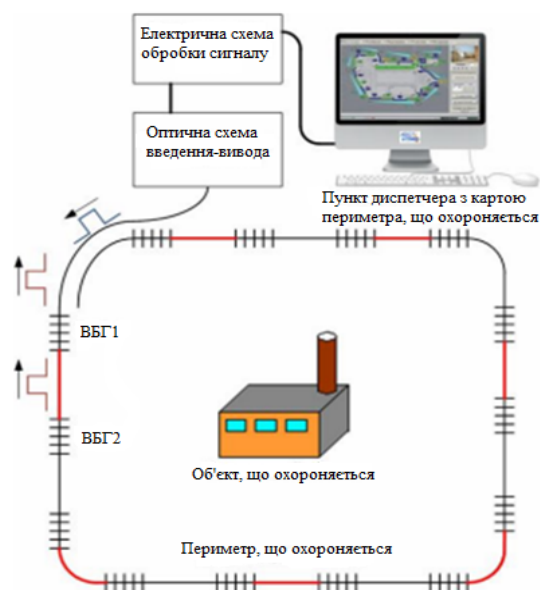


Рис.2.7.1 – Принцип дії волоконно-оптичної периметральної системи охорони на бреґівських ґратках

Волоконно-оптична система захисту на брегтівських ґратках є універсальною, оскільки це єдиний кабель по всій довжині і не містить активних елементів у багатозоновій секції. Тому діючу систему можна використовувати приховано (під землею) так і монтувати на існуючі огорожі по периметру, що охороняється (рис.2.7.2).



Рис.2.7.2 - Варіанти установки волоконно-оптичної системи охорони периметра на брегтівських ґратках

Характерною особливістю цих систем безпеки та моніторингу є не лише можливість визначити точне місце порушення захищеної межі, але також впізнання та ідентифікація зловмисника шляхом аналізу акустичного спектру шуму зловмисника.

### **Висновки до розділу**

У даному розділі було реалізовано теоретичний та практичний огляд методу реєстрації сигналів вторгнення на основі бреггівських ґрат. Було проаналізовано датчик на ґратці Брегга, адже він є маловивченим типом датчика, відповідно він має великий потенціал для моніторингу розподілених параметрів. Досліджено волокнисту бреггівську ґратку, розглянуто її унікальні характеристики для роботи в якості датчика, а також головні переваги даної технології. Проаналізовано спектральні властивості, розглянувши однорідну ґратку Брегга. Розглянуто сенсорну систему на основі найпростішого волоконно-оптичного датчика. Досліджено принцип дії розподілених вимірювальних комплексів з оптичними волокнами на основі фазових інтерферометричних датчиків в найпростішому випадку (один датчик), як працюють самі ґратки і т.д. Було досліджено конфігурацію волоконно-оптичної системи на основі сенсорної мережі ВБГ. Також встановлено головні принципи ієрархічного виявлення та ідентифікаційного потоку в системі на основі ВБГ. Як показали кореляційні характеристики несприйняття та кілька типових сигналів вторгнення для датчиків деформації ВБГ мають відмінні криві автокореляції. Підсумовуючи усе вищесказане, було зіставлено принцип роботи системи безпеки об'єкта на основі бреггівських ґраток.

### **Розділ 3. Основи технологічного рішення при створенні волоконних бреггівських ґраток. Методи запису волоконних бреггівських ґраток**

#### **3.1 Порівняльний аналіз способів створення одномодового волокна**

Актуальна технологія виробництва оптичних волокон виглядає наступним чином: є витяжка зі скляною заготовкою, поверхневі шари якої належно леговані різними оксидами. Скляні заготовки випускаються у формі циліндричного стержня, саме з нього витягується оптоволокно. Після того, як заготовка сильно підігріється, можна витягати з неї волокно. Воно одразу покривається шаром полімеру товщиною кілька мікронів, так званім первинним покриттям, для механічного захисту.

Така установка, сягає у висоту близько 7 метрів і має досить складну конструкцію, з точними технологіями вимірювань і контролем технології за допомогою мікро-ЕОМ. Механізм подачі передає заготовку в зону витяжки за допомогою опірної печі або пальника. Після виходу з цієї зони вимірюється волокно і виміряні значення передаються в систему управління. Час відповіді має бути не більше ніж 0,1-0,03 с, а результуючий діаметр відхилення від потрібних значень не має перевищувати 2%. Потім сопло нагріває основний шар волоконного покриття. Що стосується силіконових смол для загартування використовуються теплові печі, а якщо акрилові – ультрафіолетове світло. Кількість печей та загальна довжина зони затвердіння залежать від швидкості витяжки. При нанесенні первинного покриття досягається швидкість до 5 м / с. Первинні покриті волокна подаються на витяжну машину, керовану системою управління. Швидкість витяжки вибирається машиною на основі інформації про діаметр волокна.

Остання частина лінії - це намотувальний пристрій, після чого іноді поміщається пристрій для перевірки міцності волокна.

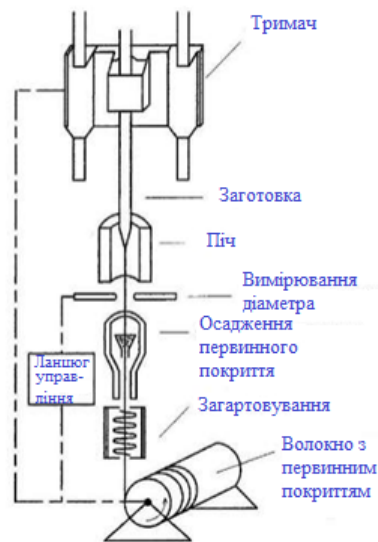
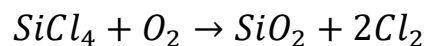


Рис.3.1.1 – Витяжка оптоволокна із заготовки

Приготування заготовки засноване на окисленні тетрахлорида кремнію:



Можливі й інші схожі реакції окислення, під час яких утворюються дуже маленькі частинки твердих оксидів. Ці частинки осідають на поверхні і утворюють пористий шар, який плавиться із підвищенням температури у так званих заготовках, від яких оптичне волокно проходить далі. У виробництві заготовок застосовуються різні технології, які відрізняються або в напрямку, в якому компоненти реагують, або в механізмі реакції. Підготовка заготовки - найважливіша операція у всьому виробничому процесі, оскільки всі волоконні властивості визначаються властивостями цієї заготовки.

Наступні технології використовуються при приготуванні заготовки шляхом хімічного осадження пари (CVD):

1) Технологія **VAD** розроблена в Японії компанією NTT. У цьому способі частинки, які згодом утворюють ядро і оболонку, осідають на підкладці в осьовому напрямку, і тому циліндр утворюється без центрального

отвору. Важливою є не тільки відсутність центральних отворів, що призводить до зменшення втрат, але, перш за все, можливість безперервно обробляти заготовку. Склужвання проводиться в електричній печі при температурі 1500 °С в атмосфері  $He - CO_2$  або  $H_2 - SiCl_4$ , в якій вода відштовхується. Під час склужвання об'єм заготовки зменшується у вісім разів, а діаметр заготовки становить приблизно 2,5 см, потім її витягують до діаметра 1 см і переносять у кварцову трубку.

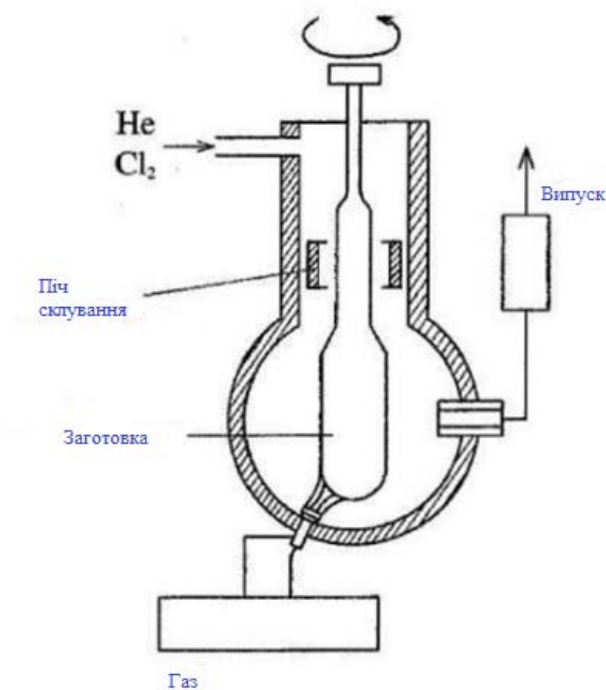


Рис.3.1.2 – Технологія VAD

Використовуючи цю технологію, немає центрального провалу профілю показника заломлення. Швидкість осадження становить 0,4 г / хв. Можна виготовити більше 100 км волокна з однієї заготовки. Управління процесами VAD дуже обережне. Переломлення залежить від розподілу температури на поверхні заготовки, положення та кута полум'я. Витрата сировини, матеріалів, пального та вихлопних газів, швидкість обертання пористої заготовки та її положення повинні бути постійними. Підвищення швидкості осадження викликає певні проблеми. Ефективність осадження  $SiO_2$  становить від 60 до 80%.



2) Технологія **PCVD** - розроблена в науково-дослідних лабораторіях Philips. Технологія одного з внутрішніх методів та характеризується застосуванням неізотермічної плазми, у якій відбувається реакція. У трубці тиск 1330 Па. Вона розташована горизонтально в печі при температурі 1200 °С. СВЧ-генератор, який міститься у печі, рухається навколо трубки і має швидкість 8 м/хв, вздовж довжини 70 см. Працює він з частотою 2,45 ГГц. Описаний спосіб забезпечує дуже тонкі шари (до 700 шарів приблизно 0,5 мкм) і має перевагу для волокна з градієнтним профілем. Це пов'язано з тим, що енергія для реакції поставляється безпосередньо, а не через стінки трубки. Після застосування основних матеріалів температура в печі підвищується до 2000 °С з подальшим розпадом кварцової трубки. Виробнича швидкість 0,5 г / хв (рис. 3.1.3).

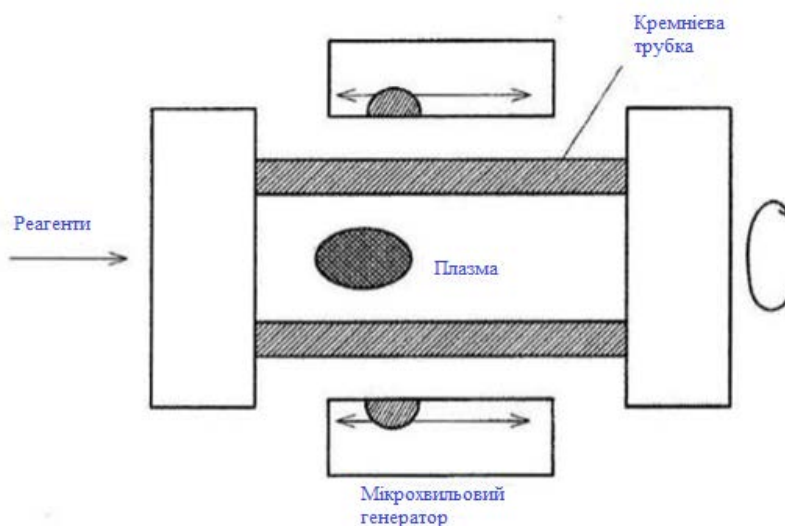


Рис.3.1.3 – Технологія PCVD

3) Технологія **MCVD** заснована на внутрішньому окисненні газової фази в реакційній зоні, всередині обертається трубка з діоксиду кремнію, по якій рухається киснево-водневе полум'я. Сьогодні це найпоширеніший метод. Перевагою цього методу є високий рівень чистоти основного процесу, навколишнє середовище практично не забруднюється. Заготовки готуються нагріванням кварцової трубки з шаром спеченої сажі при температурі близько 1900 °С. Під час виробництва використовується швидкість

осадження 0,4 г / хв, що відповідає 40 - 160 м волокна за хвилину, з можливістю складання волокна загальною довжиною від 10 до 15 км (рис. 3.1.4). Використовуючи заготовки, виготовлені за технологією MCVD, можна виготовити багатомодові та одномодові світловоди зі ступінчастим або градієнтним профілем.

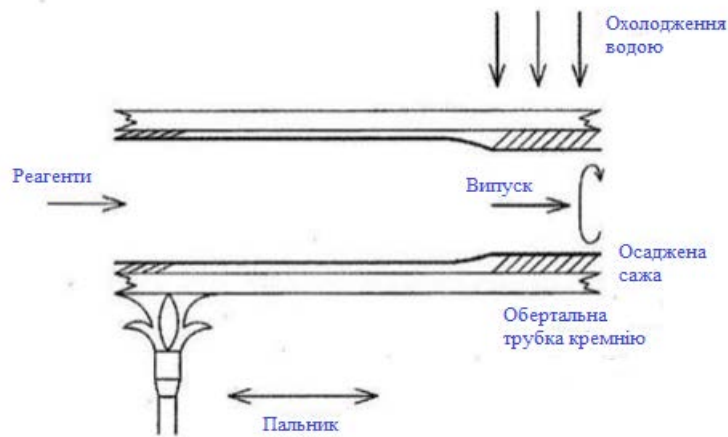


Рис.3.1.4 – Технологія MCVD

Загасання багатомодового волокна становить 3 дБ / км при довжині хвилі 850 нм і 1 дБ / км при 1300 нм при пропускній здатності в кілька ГГц / км. Пікові значення значно кращі, з загасанням менше 1 дБ / км і пропускною здатністю в десятки ГГц / км. В одномодових волокнах загасання при 1550 нм менше 0,2 дБ / км, пропускна здатність - 10 ГГц / км.

4)Технологія **OVD** - даний метод використовує бічне осадження на ядро, яке обертається з постійною швидкістю.

Зазвичай ядро має діаметр 0,5 см і виготовляється з  $Al_2O_3$  або графіту. Паливо,  $SiCl_4$  та відповідні домішки подаються в пальник. Гідроліз парів галогенідів полум'я призводить до утворення твердої сажі оксиду чи суміші оксидів, частина яких осідає на ядро, утворюючи пористий матеріал з щільністю близько 1/3 щільності кремнієвого скла. Шари легуються на стрижень, після чого вони формуються в витягнуте волокно. Після легування стрижень обережно видаляють через різне теплове розширення, а пориста структура спікається в печі при температурі близько 1500 ° С (рис. 3.1.5). Спалювання паливного газу супроводжується утворенням ОН-груп. Під час

спікання потік  $\text{He}$  з кількома відсотками  $\text{Cl}_2$  ефективно видаляє  $\text{OH}$ -групи. Цей метод висуває високі вимоги до захисту навколишнього середовища від забруднення. Контроль технології OVD також потребує: необхідності підтримувати постійну швидкість потоку сировини та палива, обертання заготовки та постійну температуру пальника. Під час склування швидкість газу, обертання та температура пальника мають бути постійними. Під час склування між домішками та газом відбуваються хімічні реакції, що призводять до зміни профілю показника заломлення. Ці зміни враховуються заздалегідь і таким чином, щоб після реакції з газом профіль був правильним. Можна виробити волокно довжиною більше 10 км і діаметром 125 мкм з однієї заготовки. Сьогодні швидкість виробництва сягнула понад 2 г / хв, що відповідає 75 м волокна в хвилину. Досягнуто низьких значень загасання, пропускна здатність досягає 1 ГГц / км.



Рис.3.1.5 – Технологія OVD

### 3.2 Створення бреггівських ґраток в оптоволоконні

Волоконні бреггівські ґратки можна виробляти різними способами, кожен з яких застосовується до конкретних структур ґрат і має свої переваги та недоліки.

Сучасні тенденції розвитку методів виробництва ВБГ включають:

- обробка оптичних волокон газом водню під високим тиском задля підвищення їх фоточутливості;
- активне використання ультракоротких лазерних імпульсів для виготовлення ґрат;

- запис ВБГ безпосередньо в процесі витяжки волоконного світловода і т.д.

Процес запису потрібної структури ґратки може зайняти кілька десятків хвилин, виготовлення високоякісної ґратки можливе лише при високій стабільності інтерференційної картини. Такі умови можуть бути забезпечені лише хорошою просторовою та часовою когерентністю фотоіндукуючого випромінювання, що пред'являє суворі вимоги до джерел випромінювання для запису ВБГ.

Для запису ВБГ запропоновано різні схеми, там де способом зведення пучків УФ-випромінювання під кутом  $\alpha$  утворюється інтерференційна картина і вона має період інтерференції  $\Lambda$ . Період  $\Lambda$  визначається так:

$$\Lambda = \frac{\lambda uv}{2\sin(\frac{\alpha}{2})}$$

Де  $\lambda uv$  – довжина хвилі УФ-випромінювання. Період БГ збігається з періодом інтерференційної картини  $\Lambda$ . Перший інтерферометр, що використовується для запису брегівських ґраток, використовував поділ УФ-випромінювання за допомогою світлороздільної пластини на два пучка, які потім зводилися під кутом. Одна з схем цього типу інтерферометра показана на рисунку 3.2.1. Для забезпечення висококонтрастної інтерференційної картини вибирають світлороздільну пластину так, щоб інтенсивність зведених пучків була однаковою. Циліндрична лінза використовується для фокусування випромінювання на серцевині волоконного світловода. Інтерферометри з розподілом амплітуди мають гнучкість у виконанні параметрів ґрат(довжина, період), але потребують високої просторової та часової когерентності випромінювання. Крім того, інтерферометри цього типу мають досить значні недоліки. По-перше, вони мають високу чутливість до механічної вібрації оптичних компонентів, субмікронні переміщення яких призводять до зміщення інтерферометричних смуг. По-друге, оскільки відокремлені пучки проходять через повітря порівняно великий шлях,

локальні коливання повітря, змінюючи його показник заломлення, значно ускладнюють набуття стійкої інтерференційної картини.

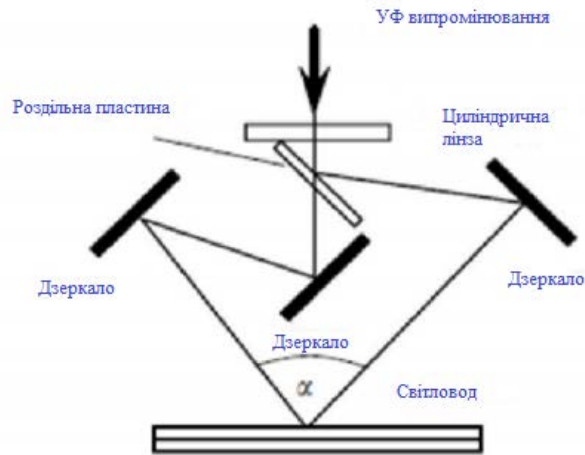


Рис.3.2.1 - Схема запису брегівських ґраток в інтерферометрі з розподілом амплітуди

### 3.3 Запис волоконних брегівських ґраток методом фазової маски

Індукування брегівських ґраток в ОВ одиночним імпульсом ексимерного лазера методом фазової маски є найбільш ефективним та простим, оскільки дозволяє виключити зі схеми запису дорогі віброізолюючі столи, розв'язані фундаменти та основи, необхідні для багатоімпульсного запису, отримуючи ґратки з необхідними характеристиками. Принципова схема запису ВБГ методом фазової маски показана на рисунку 3.3.1.

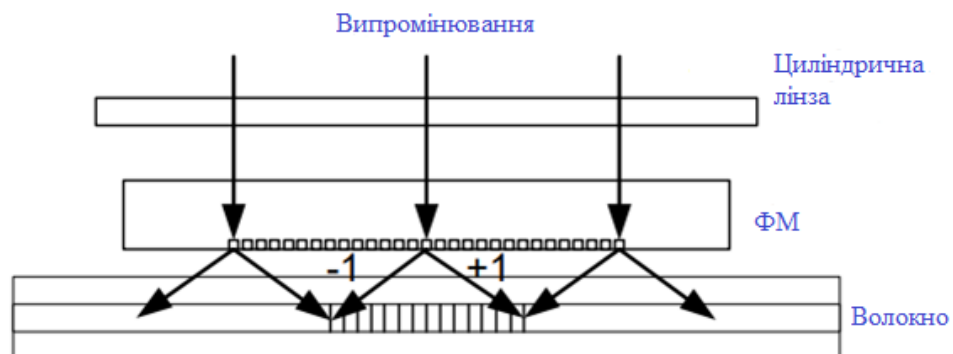


Рис.3.3.1 – Принципова схема запису ВБГ методом фазової маски

Циліндрична лінза фокусує випромінювання вздовж однієї з осей для досягнення бажаної щільності енергії. Випромінювання, яке проходить через

фазову маску, дифрагує на  $+1$  і  $-1$  порядки. Інтерференційна картина  $+1$  та  $-1$  порядків здійснює запис ґратки ПЗ в серцевині ОВ, фіксовану на відстані декількох мікронів від ФМ.

З іншого боку, цей метод не дає змоги змінити довжину хвилі відбиття ВБГ через фіксовану величину періоду ФМ. Цей метод також не дає можливості здійснювати запис бреггівських ґраток під час витяжки волокна, оскільки це вимагає відсутності оптичних елементів поблизу рухомого світловода.

Крім того, при використанні ультрафіолетового світла слід провести процедуру видалення захисної полімерної оболонки волокна перед записом ґратки. Ця процедура необхідна, оскільки стандартні полімери, які використовуються як волокнисті оболонки, непрозорі для ультрафіолетового світла. Видалення оболонки призводить до подовження виробничого процесу волокна із зафіксованою дифракційною структурою та зменшує міцність ОВ.

Хоча існує кілька способів записувати ґратки ПЗ за допомогою УФ-випромінювання через полімерне покриття, вони мають суттєві недоліки. Один базується на тому, що стандартне полімерне покриття є більш прозорим у ближньому УФ-діапазоні (300-364 нм), ніж у традиційному для запису діапазоні (244-248 нм). Проте це вимагає збільшення додаткового легування такого волокна, щоб компенсувати низьку фоточутливість скла при цих довжинах хвиль. Інший метод заснований на застосуванні спеціального покриття, прозорого для необхідного діапазону ультрафіолетового випромінювання, але цей метод є менш ефективним з точки зору необхідних виробничих витрат.

### 3.4 Запис волоконних брегівських ґраток інтерферометричним методом

Метод запису брегівських ґраток в інтерферометрі Тальбота, показаний на малюнку 3.4.1, дає можливість здійснювати запис брегівських ґраток в процесі витяжки ОВ за рахунок відсутності оптичних елементів поблизу рухомого світловода.

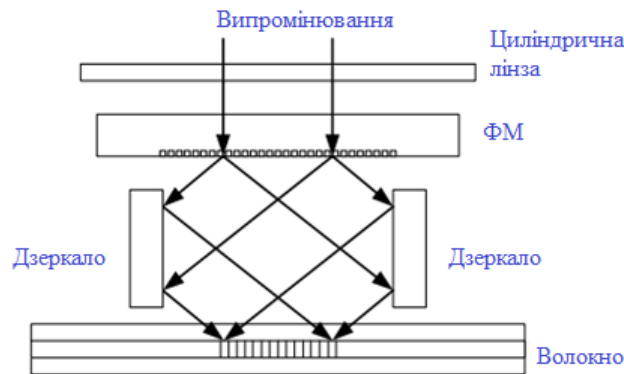


Рис.3.4.1 – Запис ВБГ в схемі з інтерферометром Тальбота

Крім того, змінюючи кут між променями в цій схемі, можна підлаштувати період інтерференційної картини і згодом період ґратки ПЗ, який відображає випромінювання відповідно до умови Бреґґа. Таким чином можна записати ґратки, які відображають будь-яку довжину хвилі в дуже широкому діапазоні. Цей спосіб також дозволяє повністю зняти нульовий порядок дифракції з фазової маски завдяки використанню поглинального екрану і не має залежності видимості інтерференційної картини від розподілу просторової когерентності в лазерному пучку внаслідок інтерференції світлових променів, що виходять з однієї точки пучка.

Таким чином, інтерферометр Тальбота реалізує амплітудне розділення оптичного випромінювання, яке може виконуватися або ФМ, як у цій схемі (рис. 3.4.1), або за допомогою кубика. Існує також інтерферометрична схема запису ВБГ з просторовим розділенням пучка світла, яка реалізована за допомогою інтерферону Ллойда, показаного на малюнку 3.4.2.

Такий інтерферометр (рис. 3.4.2) можна створити, наприклад, за допомогою діелектричного дзеркала, яке розділяє передню частину пучка на

дві рівні частини. Як і в попередній схемі, тут можна змінити кут між променями, обертаючи дзеркало разом із закріпленим на ньому ОВ. Завдяки меншій кількості оптичних елементів у порівнянні з інтерферометричними схемами запису ґраток ПЗ з амплітудним розділенням оптичного випромінювання ця схема має кращу стабільність.

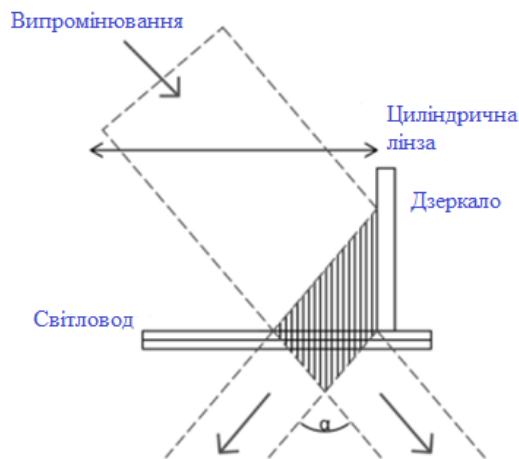


Рис.3.4.2 – Запис ВБГ у схемі з інтерферометром Ллойда

Недоліком цієї схеми є високі вимоги до просторової когерентності оптичного випромінювання, оскільки інтерферують промені, що вийшли з різних точок пучка світла.

### 3.5 Запис волоконних брегівських ґраток покроковим методом

Ще один використовуваний в даний час метод запису - покроковий метод. Привабливість цього методу полягає в тому, що він виключає необхідність використання фазової маски і дозволяє записувати ґратки з брегівським резонансом на будь-якій довжині хвилі. Крім того, цей спосіб дозволяє формувати довільні профілі окремого штриха ґратки та весь розподіл амплітуди наведеного ПЗ в цілому, а також змінювати період по всій довжині ґратки. Принципова схема поетапного запису ВБГ показана на малюнку 3.5.1.



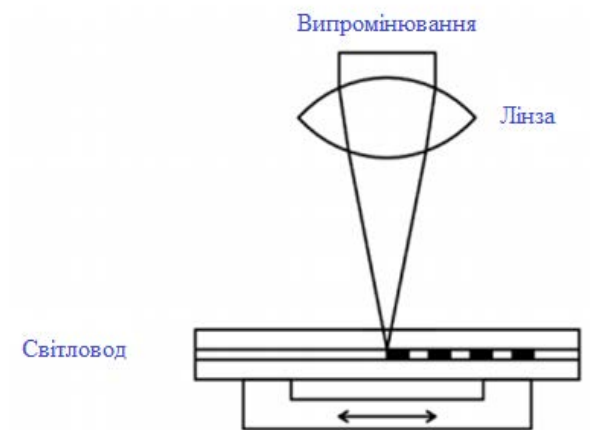


Рис.3.5.1 – Принципова схема запису ВБГ покроковим методом

Однак у цього методу є кілька суттєвих недоліків: необхідність точної механічної трансляції ОВ вздовж сфокусованого випромінювання та неможливість записувати ґратку ПЗ одним імпульсом.

## **Висновки до розділу**

У даному розділі були розглянуті основні принципи технології виробництва волоконної бреггівської ґратки. Також було здійснено порівняльний аналіз способів створення одномодового волокна. Досліджено роботу спеціальної установки, за допомогою якої власне і здійснюється виробництво оптичних волокон. Проаналізовано технології, які використовуються при приготуванні заготовок шляхом хімічного осадження пари. Саме з такої заготовки витягають оптоволокно. Кожна з технологій має певні індивідуальні відмінності, які також було розглянуто. Волоконні бреггівські ґратки можна виробляти різними способами, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Розглянуто сучасні тенденції розвитку методів виробництва волоконних бреггівських ґраток. Досліджено основні методи запису ВБГ, а саме: метод фазової маски, інтерферометричний та покроковий методи.

## **ВИСНОВКИ**

Волоконно-оптичний кабель має переваги та недоліки. У сучасній мережі оптичний кабель стає все більш популярним, ніж раніше, і зазвичай широко використовується.

Хоча деякі волоконно-оптичні кабелі можуть мати більш високі початкові витрати, ніж мідні, довговічність і надійність волокон можуть знизити загальну вартість володіння. У міру розвитку технологій вартість волоконно-оптичних кабелів та відповідних компонентів ще більше знижується.

Волоконно-оптичні кабелі замінили традиційні мідні виті пари або коаксіальні кабелі. Оскільки використання та потреба у високій пропускну здатності та високій швидкості не викликає сумнівів, волоконно-оптична передача надасть більше можливостей та буде постійно досліджуватися та розширюватися для задоволення майбутніх потреб.

У дипломній роботі були розглянуті декілька способів реєстрації вторгнення на об'єкт, після чого було взято за основу найбільш оптимальний спосіб, який базується на волоконних бреггівських ґратках. Також було здійснено теоретичний та практичний аналіз даного способу захисту периметру. Були розглянуті принципи роботи та функціонування волоконно-оптичних датчиків, а також основи їх виробництва. Проаналізовано практичне застосування методу бреггівських ґраток і як саме ці ґратки з'являються в оптоволокну. Також були детально розглянуті основні методи запису бреггівських ґраток.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку.-3-є вид., перероб. і допов. – К.:Кафедра, 2019.-324 с.
2. What Is Optical Fiber Technology, and How Does It Work? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nai-group.com/optical-fiber-technology-how-it-works/>.
3. Волоконно-Оптические Сенсоры В Системах Охраны Периметра [Електронний ресурс]. – 17. – Режим доступу до ресурсу: [http://guarda.ru/infra\\_red/18/](http://guarda.ru/infra_red/18/).
4. Системы охраны периметра с волоконно-оптическими сенсорами (РБ) [Електронний ресурс]. – 4. – Режим доступу до ресурсу: <https://aercom.by/sistemy-oxrany-perimetra-s-volokonno-opticheskimi-sensorami-v-rb/>.
5. Куликов А. ОБЗОР ВОЛОКОННООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА / А. Куликов, А. Игнатьев. – С. 56–61..
6. Пальчун Е. Н. Выбор системы охраны периметра [Електронний ресурс] / Е. Н. Пальчун, В. А. Селищев – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-sistemy-ohrany-perimetra/viewer>.
7. Введенский Б. С. Системы охраны периметров с волоконно-оптическими сенсорами [Електронний ресурс] / Борис Сергеевич Введенский – Режим доступу до ресурсу: [http://www.gsm-guard.net/press3\\_3.html](http://www.gsm-guard.net/press3_3.html).

8. Paschotta R. Fiber Cables [Электронный ресурс] / R. Paschotta – Режим доступа до ресурсу: [https://www.rp-photonics.com/fiber\\_cables.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_cables.html).
9. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРОВ / А. В.Поляков, М. А. Ксенофонтов, В. С. Васильева, О. О. Гавриленко. – С. 257–261.
10. Intelligent Detection and Identification in Fiber-Optical Perimeter Intrusion Monitoring System Based on the FBG Sensor Network [Электронный ресурс] // PHOTONIC SENSORS. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.semanticscholar.org/paper/Intelligent-detection-and-identification-in-system-Wu->
11. Середа П.В. Прецизионное определение параметров волоконных брэгговских решеток //Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург 2005.
12. Э.Удд. Волоконно-оптические датчики. М.:Техносфера, 2008. - 520с
13. WHAT IS FIBER BRAGG GRATING ?[Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046406-what-is-fiber-bragg-grating>.
14. Куликов А. В. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ, КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА / А. В. Куликов – Санкт-Петербург, 2010. – С. 274–278.
15. Tai H. Theory of Fiber Optical Bragg Grating

16. Fiber Bragg Grating [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:  
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/fiber-bragg-grating>.
17. Fiber Bragg Gratings [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:  
[https://www.rp-photonics.com/fiber\\_bragg\\_gratings.html](https://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html).
18. What is a Fiber Bragg Grating? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.hbm.com/en/4596/what-is-a-fiber-bragg-grating/>.
19. Куликов А. В. ВОЛОКОННЫЕ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ / А. В. Куликов. – Санкт-Петербург: Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО 197101, Санкт-Петербург,, 2015. – 39 с.
20. Kashyap R. Fiber Bragg Gratings / Raman Kashyap. – London: Academic Press. – 447 с.
21. С.В. Варжель Волоконные брэгговские решетки - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015, 2015. - 64 с. - экз.
22. Пнев А. Б. Пнев А.Б. Оптико-электронные измерительные системы на основе квази-распределенных волоконно-оптических брэгговских датчиков : дис. канд. техн. наук / Пнев А. Б. – Москва, 2008. – 176 с.
23. Окоси Т. и др. 037 Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ; Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатом издат. Ленингр. отд-ние, 1990.— 256 с: ил. ISBN 5-283-02466-0 (СССР); ISBN 4-274-03123-3 (Япония).

24.Ільченко А. Т. Волоконно-оптичний датчик з розподіленими параметрами / Ільченко А. Т. – Київ, 2018. – 63 с.

25.Волокнистая брэгговская решетка [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber\\_Bragg\\_grating](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating).

Додаток А  
**SUMMARY**



## **ABSTRACT**

The perimeter security system is always the first technical frontier for object protection; the reliability and effectiveness of this line is very important for the early detection of the intruder. The objectives of any security system are to detect a dangerous event early, localize the place, time and nature of the event, signal the event, document the event, initiate measures that impede the development of the event, and, finally, present materials for the prevention of such events in the future. Perimeter systems are characterized by a variety of physical principles on which the operation of security sensors is based, so the range of security systems produced is very wide. The principle of operation of all systems is based on the fact that the intruder crossing the perimeter creates disturbances in certain physical parameters of the medium, which are detected by special sensors. Sensor signals are processed by an electronic unit (analyzer or processor), which generates an alarm.

For developments that have appeared in recent years, we can note some general trends:

- The introduction of digital methods for processing sensor signals allows you to create "intelligent" systems with functions such as recognition of typical intrusion signals, localization of the intruder within the security zone, remote diagnostics and sensor settings, etc.
- Network technologies are increasingly being used to collect and centrally process sensor signals.
- Reducing the energy consumption of sensors allows you to create systems with autonomous power supply, the sensors of which are adapted for hidden installation on the perimeter.

It is clear to everyone that the perimeter security system must be reliable, economical, anti-jamming and hardly noticeable. The specifics of operating conditions imposes additional requirements related to temperature fluctuations, strong winds, snowfalls and blizzards, hail, etc. If we also take into account the

economic restrictions of domestic customers, the choice of the perimeter system often becomes a very difficult task.

The perimeter boundary of the object is the best place for early detection of intrusions. The intruder, interacting, first of all, with the physical perimeter, creates disturbances that can be detected by special detectors, be it a fence in the form of a metal grate - it must be cut or climbed over it; whether it is a wall or a barrier - they will have to be overcome from above; if it is a wall or roof of a building, they must be destroyed; Well, if this is an open territory, it must be crossed. By causing physical contact of the intruder with the perimeter, we get the opportunity to detect this intrusion by appropriate means, and to detect it at the first line of guard, i.e. on the perimeter. Thus, perimeter security systems are the most effective means of protection against unauthorized entry, since they give an alarm long before an attacker can penetrate into especially important areas of the protected object.

First of all, any such system must meet a number of criteria:

- As already noted, this is the possibility of early detection of the intruder, even before he penetrates the object;
- the absence of "dead" zones and, as far as possible, exact following the contours of the perimeter;
- hidden installation;
- immunity to changes in climatic conditions (such as temperature, pressure, humidity, etc.);
- immunity to electromagnetic industrial interference near the protected object.

In addition to all this, systems should have the highest possible sensitivity to detect even the most experienced intruder, but at the same time they should provide a low probability of false positives.

Obviously, from the set of modern perimeter security systems it is impossible to single out one that would be universal and the best from all points of view. When choosing and designing a security system, it is necessary to take into account many factors - the terrain, the topography of the object, the design and material of the

fence, environmental conditions, industrial interference, the organization of the security service, etc.

Many manufacturers are interested in creating new underground security systems using passive sensors that do not emit radio frequency energy. The use of fiber-optic signal sensors in perimeter security systems to protect approaches to objects or restricted areas is promising. The optical cable is located along the border of the protected perimeter and is masked by a protective coating. The sensory properties of the optical fiber are due to the fact that the structure of the light wave in the fiber is extremely susceptible to external influences, which can modulate the amplitude, phase, mode composition or polarization of the wave. In fiber-optic sensor systems, these characteristics are analyzed and, as a result of demodulation and signal processing, data are obtained on the effect on the optical fiber or on the carrier medium with which the optical fiber is rigidly connected. The sensor detects pressure changes caused by a walking or crawling person.

Deformation of an optical fiber changes its optical parameters and, as a result, the characteristics of the radiation passing through the fiber. Due to the specificity of the physical principles used, fiber-optic systems are characterized by a very low susceptibility to electromagnetic interference, which allows them to be used in an unfavorable electrophysical environment.

An optical fiber is generally a coaxial fiber. Light propagates along the central part (core) of the cable. A transparent shell adheres to the fiber core, which has a lower refractive index than the core. Light propagating at an angle to the axis of the fiber is reflected from the interface between the core and the sheath and is concentrated in the central part of the fiber. An external opaque coating serves to mechanically protect the cable.

Miniature semiconductor lasers or LEDs are typically used as a radiation source. At the cable output, radiation is detected by a photodetector, which converts the optical signal into an electrical one. When the fiber deforms, the conditions of internal reflection change, as a result of which the phase and spatial characteristics

of the beam at the cable exit undergo changes. These changes are recorded by the photodetector and processed by the signal analyzer.

Fiber-optic distributed sensors are widely used to protect perimeters and can be used to organize signal lines of various types. The undoubted advantages of fiber-optic systems include their immunity to electromagnetic radiation and electrical safety.

Most systems use commercially available fiber optic cables; although for some heavy fences the sensitivity of such sensors is insufficient.

Fiber sensors built from dielectric elements can be used not only on fences or walls, but also on explosive objects or under water.

The maximum length of one security zone can reach tens of kilometers. An attractive feature of the systems is the absence of active electronic equipment on the perimeter; this reduces the cost of installation and maintenance of the security system.

The limitations of the use of fiber-optic systems include the complexity of the procedure for splicing and repairing cables in the field, which requires the use of a microscope and an expensive device for welding fibers.